C. Negro

Matteucci

Elettro-Fisiologia

CORSO

DI ELETTRO-FISIOLOGIA

IN SEI LEZIONI

DATE IN TORINO

DAL

PROF. CARLO MATTEUCCI

SENATORE DEL REGNO

RACCOLTE STENOGRAFICAMENTE

E

RIVEDUTE DALL' AUTORE

TORINO
TIPOGRAFIA CASTELLAZZO E VERCELLINO
1861.

AVVISO

—

L'accoglienza, a buon diritto favorevole, che il colto pubblico Torinese fece all'idea manifestata dal Professore Matteucci, Senatore del Regno d'Italia, di dare un corso di lezioni di Elettro-fisiologia, assicurava il valente Professore Pisano che le sue parole sarebbero state ascoltate da un scelto e numeroso concorso. Ma parve a noi che se le sue lezioni fossero dall'arte nostra fissate sulla carta, e quindi venissero per mezzo della stampa sparse a comodo delli studiosi, la utilità se ne accrescerebbe e si farebbe durevole; e quindi credemmo che questo nostro pensiero riuscirebbe gradito e vantaggioso. Però, ottenutone il consenso dall'insegnante, ci ponemmo all'opera e potemmo far uscire alla luce le mentovate lezioni di mano in mano che furono pronunziate. Grati al Prof. Matteucci che gentilmente annuiva alla nostra richiesta, vogliamo

qui tributargli la nostra riconoscenza; desideriamo col nostro buon volere di fargli provare la giusta compiacenza di vedere utilizzata stabilmente la sua fatica; e vogliamo credere che sia per essere aggradita la nostra piccola impresa dalla studiosa gioventù, la quale si consacra specialmente all'esercizio della Medicina, che già ricava dalla scienza dei fenomeni fisico-chimici dei corpi viventi dei segnalati vantaggi, e vede diradarsi le tenebre che tuttora cuoprono i misteri della vita.

Li Stenografi
FERDINANDO GUIDOTTI.
GIUSEPPE BARUZZI.

INDICE DELLE MATERIE

LEZIONE PRIMA

(11 *aprile* 1861)

Signori,

Vi ringrazio dell' accoglienza che fate a questo Corso, accoglienza che non prendo per me, ma per l' idea dalla quale fui mosso e che esprime in qualche modo, come tutto quello che facciamo oggi in questo Paese, il sentimento da cui siamo tutti animati. Un professore dell'Università di Pisa che viene a dare il suo Corso a Torino, dove risiede ora come Senatore del Regno, è una specie di mobilizzazione dell' alto insegnamento, è un altro simbolo della nostra unione nazionale.

Io non spero già di dirvi delle cose nuove: spero però d' infondervi un po' di quell' ardore vivissimo che provo, e che maggiori doveri fanno oggi per qualche tempo tacere, per una delle scienze le più fertili, le più belle dei tempi moderni, *la scienza dei fenomeni fisico-chimici dei corpi viventi.* È una scienza che ebbe in Italia forse i suoi primi inventori e che non cessò mai

di essere coltivata fra noi, e i nomi di Redi, di Fontana, di Spallanzani, di Galvani, provano luminosamente questa verità.

Uno dei più grandi genii del nostro secolo aveva ben capita questa verità: si racconta che quando Lagrange diceva a Napoleone che non si poteva fare un' altra scoperta più grande di quella di Newton della legge dell'attrazione universale, perchè non vi era che un mondo solo, Napoleone rispondesse che c' era anche — *le monde des détails.* — Questo mondo è appunto quello dell' organismo vivente.

Ma entriamo in materia. Cos' è l' Elettro-fisiologia?

Nei primi tempi, subito dopo la scoperta della macchina elettrica e della bottiglia di Leyda, tanta era la meraviglia che facevano i fenomeni elettrici, che si attribuivano all' elettricità effetti straordinari sugli animali e sui vegetabili. E naturalmente questa meraviglia non venne meno dopo la scoperta di Galvani, delle contrazioni eccitate nella rana dal passaggio dell'elettricità. Si credeva allora che fosse dimostrato quello che in realtà non era che un frutto dell' immaginazione, che cioè le piante elettrizzate crescevano molto più rapidamente e più rigogliose delle non elettrizzate, che l' elettricità rendeva fertile il terreno e che un ammalgama di zinco messo in luogo del cervello di un animale poteva restituirgli la sensibilità e l' intelligenza. Come di giusto questi orgogli della falsa scienza non tardarono presto ad essere corretti da esperienze rigorose, le quali ci hanno poi condotto in questi ultimi tempi a fondare la scienza dell' Elettro-fisiologia, cioè una parte della Fisica che ha dei fatti ben dimostrati, alcune leggi stabilite e

forse anche qualche ipotesi che interpreta il maggior numero di quei fatti.

L'Elettro-fisiologia si distingue in due parti, cioè: l'azione dell'elettricità sopra i vegetabili e sopra gli animali, azione che si manifesta con effetti propri e dipendenti dallo stato di vita dell'organismo, e lo sviluppo dell'elettricità nel seno dell'organismo vivente.

Per essere breve comincierò dal citarvi alcuni esempi di fenomeni che si erano creduti del dominio dell'elettricità animale, ma che in realtà non vi appartengono. Così, come prova dell'elettricità animale in alcuni libri non moderni, o volgarmente parlando, si cita la forte elettricità sviluppata nello strisciare colla mano sopra un gatto vivo, oppure nel cavarsi le calze di seta in una stagione asciutta. Sono questi fenomeni di elettricità sviluppata per confricazione e che, come lo vedete, si ottengono egualmente confricando una pelle di gatto con una mano. Fu detto anche che vi erano correnti d'elettricità animale toccando colle due estremità del galvanometro la lingua e la fronte bagnata da sudore, oppure introducendo quelle due estremità nel fegato e nello stomaco di un animale vivo. Le correnti vi sono, ma sono della stessa natura di quelle che ottengo immergendo quelle estremità l'una nella soluzione di potassa, l'altra nell'acido solforico o nell'acido nitrico, facendo in modo che questi due liquidi siano messi in contatto. Per imitare quell'esperienza si bagna un panno nell'acido e un altro nell'alcali, si fanno toccare insieme i due panni e poi si chiude il circuito colle due estremità del galvanometro e si ha una corrente diretta dal panno alcalino all'acido. Ora, il sudore è acido come lo è il sugo

gastrico dello stomaco, la saliva e la bile hanno una reazione alcalina e perciò si hanno quelle correnti dirette nell' animale dal liquido alcalino all' acido. Anche un illustre fisiologo torinese, il Bellingeri, in una Memoria sull' elettricità dei liquidi animali, aveva creduto di scuoprire fenomeni elettro-fisiologici, propriamente detti. Egli usava per fare agire una coppia di Volta, ora il sangue arterioso, ora il venoso, ora l' orina, ora la saliva. In realtà quei fenomeni ben studiati non sono e non possono essere altro che fenomeni elettro-chimici, e le differenze dipendono, se vi sono, dalla composizione chimica di questi liquidi e dalla loro diversa conducibilità. Si è anche detto che la corrente elettrica passando nell' albumina o bianco d' uovo l' *organizzava*. Il fatto è che l' albumina si coagula intorno agli elettrodi, perchè questi e il liquido si riscaldano per il passaggio della corrente e perchè l' acido e l' alcali prodotti dall' elettrolizzazione fanno coagulare l' albumina.

Ho moltiplicato questi esempi perchè, sopratutto nel principio di questo Corso, non vi rimanesse dubbio sulla distinzione che bisogna fare fra fenomeni elettro-fisiologici appartenenti veramente all' organismo vivente, e gli effetti elettrici che si producono nei tessuti animali o vegetabili vivi o morti indifferentemente e dovuti ad azioni fisiche o chimiche conosciute.

Di questo stesso genere sono alcuni altri effetti della elettricità sulla vegetazione nei quali più tenacemente si è voluto vedere una relazione fra l'elettricità e l'organismo vivente.

Forse non ignorate che vi è una pianta acquatica, la *Chara*, di cui il fusto osservato col microscopio presenta

un fenomeno singolare. Il fusto è diviso in compartimenti, in ognuno dei quali si vedono muoversi o circolare regolarmente dei globetti o delle cellule. Questi movimenti, di cui s'ignora la cagione, si arrestano allorchè una scarica elettrica passa attraverso al fusto, e ogni circolazione cessa per sempre se la scarica fu molto forte. Naturalmente quella scarica agisce o distruggendo meccanicamente la struttura della pianta o coagulando il liquido che contiene o alterandone la composizione chimica, tutti effetti che bastano per spiegare i resultati ottenuti.

Un illustre fisico di Torino, Vassalli-Eandi, fece una serie di esperienze ingegnose, colle quali mostrò che dei semi tenuti frequentemente in presenza del fiocco di una macchina elettrica germogliavano prima di altri non così elettrizzati. Non so se il fatto sia stato poi verificato; ma esso potrebbe essere spiegato attribuendolo all'ossigene o piuttosto all'*ozone* che si sa favorire la germogliazione. E in fatti l'*ozone* si forma in contatto del fiocco elettrico. Eccovi la solita carta ozonemetrica, cioè spalmata di joduro di potassio e amido cotto. Vedete che per il passaggio della scarica elettrica la carta diventa bleu, effetto prodotto dall'*ozone*.

Vi mostro finalmente ciò che è avvenuto facendo passare una corrente elettrica per diversi giorni in un largo pezzo di flanella imbevuta di una soluzione leggerissimamente salata e sulla quale ho sparso diversi semi di senapa, di miglio e di veccie. Vedete che in contatto dell'elettrode negativo i semi sono già germogliati ed hanno anche le piccole foglie, mentre questo non è in contatto dell'elettrode positivo. Anche questo fenomeno non è un fenomeno elettro-fisiologico propriamente detto,

ma un effetto secondario della elettricità. All'elettrode negativo si sviluppa l'alcali, e al positivo l'acido, come ve lo mostrano le carte reattive. Ora nella soluzione leggermente alcalina i semi germogliano più facilmente che nell'acqua pura, e nella soluzione acida i semi non germogliano più. Nella germogliazione la diastasi deve agire sulla fecola per renderla solubile e convertirla in destrina e glucoso, e questo non avviene in presenza degli acidi, o piuttosto meglio avviene in presenza di una soluzione leggermente alcalina. Anche questo vi è provato dalle esperienze in cui indipendentemente dalla corrente ho messo gli stessi semi, ora in contatto di soluzioni leggerissimamente alcaline, ora in contatto di soluzioni acide: i primi hanno germogliato e gli altri no.

Veniamo una volta ai fenomeni elettro-fisiologici veri, cioè alle contrazioni e alle sensazioni che sono svegliate in un animale vivo o recentemente ucciso dal passaggio della elettricità. È così che si chiama la *scossa elettrica*, cioè il dolore e la contrazione muscolare involontaria che proviamo quando tocchiamo le due armature di una bottiglia di Leida carica, o i poli di una pila formata di molte coppie o le estremità di una spirale di un apparecchio d'induzione.

Prima di andare innanzi non è forse inutile che vi ricordi che la proprietà che hanno i muscoli di contrarsi è inerente alla loro natura, e che questa proprietà è principalmente risvegliata quando si eccitano i filamenti nervosi, che si distribuiscono nel muscolo. È impossibile di avere un muscolo privo affatto di nervi, col quale si potrebbe dimostrare quella verità che Haller ha detto pel primo, cioè che i muscoli possiedono la

E il m. sartorio, e il m. gracile della coscia della rana, come hanno dimostrato Kühne e Mays ?

contrattilità. Però questa verità è conforme a tutte le analogie fisiologiche e vi sono anche varie esperienze che l'appoggiano.

Eccovi qui due rane preparate; una di queste fu avvelenata col *curaro*, e l'altra fu uccisa mentre la prima moriva. Se tocco i nervi della rana avvelenata coi poli di una pila non si sveglia mai nessuna contrazione muscolare, mentre agendo colla corrente sui muscoli la contrazione si manifesta. Invece nell'altra rana la contrazione avviene nei due modi. Il muscolo può dunque contrarsi irritato direttamente quando i nervi hanno perduta la loro eccitabilità. In questi ultimi tempi un giovane fisiologo francese, il signor Faivre, ha mostrato che molte ore dopo la morte e quando i nervi hanno perduto ogni eccitabilità, l'irritabilità muscolare è invece accresciuta. Insomma sono due cose distinte; l'irritabilità dei muscoli e la proprietà dei nervi di risvegliare questa irritabilità.

Vi ricorderò ancora che per una delle più belle esperienze di fisiologia dovuta a Carlo Bell, sappiamo che dalla midolla spinale partono *radici nervose*, che prima di congiungersi per formare i così detti nervi misti che poi si spandono nei muscoli e i in tutte le parti del corpo, hanno proprietà distinte. Se si irritano le radici anteriori sono svegliate fortissime contrazioni muscolari e null'altro; e se si irritano le radici posteriori l'animale stride, dà segni di dolore, ma non vi è veruna contrazione. Irritando poi i nervi misti sopra un animale vivo si ottengono nel tempo stesso contrazioni e segni di dolore.

Cominciamo dal preparare una rana in modo che

possa servire per mostrare col passaggio della corrente elettrica le contrazioni. Perciò si taglia a metà sotto le membra superiori, si toglie la pelle, si tolgono i visceri dal pezzo inferiore e introducendo le forbici sotto i nervi spinali o lombari si taglia un pezzo del bacino, per cui il *preparato* è ridotto a un pezzo di spina, ai due plessi lombari, e alle due membra inferiori. È questa la rana preparata, come si dice, alla Galvani. Prendo una piccola coppia di Volta formata con un filo di zinco e un filo di rame o di platino torti o saldati assieme ad una estremità, e tocco la rana preparata colle altre due estremità libere della coppia. Se tocco i nervi, la rana si contrae fortemente tutta intiera, come si contrae pure fortemente toccando nervo e muscolo; mentre invece toccando semplicemente colle due estremità la sola superficie del muscolo, non vi è che una piccola contrazione nel pezzo di muscolo interposto. Evidentemente l'effetto maggiore nel primo caso dipende dall'essere eccitati dalla corrente i nervi, i quali svegliano così la contrazione in tutta la massa muscolare in cui quei nervi arrivano. Con ciò riesciamo a comprendere gli effetti particolari della così detta scossa elettrica. Si sa che il dolore non si prova che alle articolazioni, o che almeno in quei punti è più forte, e che quando cresce la quantità dell'elettricità, il dolore non si sente solo alle articolazioni delle dita, ma arriva fino alle articolazioni della mano e dal braccio. Cresce la scossa se le mani con cui si tocca la bottiglia o la pila sono bagnate e cala se sono asciutte: nel primo caso la pelle conduce l'elettricità molto meglio che quando è priva di umidità. Quando si forma una catena di persone che si tengono per la mano per poi scaricare la bottiglia, sono quelle poste all'estremità

che provano la scossa maggiore. Questi effetti diversi s'intendono facilmente coi principii della propagazione della elettricità. Bisogna anche avvertire che la conducibilità per l'elettrico della sostanza muscolare è molto più grande, cinque o seivolte almeno, di quella della materia nervosa; e questo dev'essere, perchè il muscolo è imbevuto di sangue e quindi di siero e di soluzioni saline, mentre il nervo contiene invece molta sostanza grossa. Quando l'elettricità si scarica per le mani e per il braccio avviene che nelle articolazioni dove la sezione del conduttore si stringe, dove la massa muscolare è minore, che la *densità elettrica* è nei filetti nervosi in quel punto molto maggiore che negli stessi filetti immersi in una grossa massa muscolare: da ciò la scossa, il dolor maggiore nelle articolazioni. Franklin mostrava ai suoi uditori una esperienza che si spiega nello stesso modo. Egli faceva passare la scarica di una grossa batteria attraverso a un topo vivo bagnato, e l'animale non ne soffriva: quando il topo era asciugato la stessa scarica lo uccideva. Vi sono anche dei casi di fulminazione di donne incinte rimaste uccise senza che il feto ne soffrisse. Nei due casi lo strato d'acqua ha servito a scaricare l'elettricità ed ha difeso il topo o il feto.

Premesse queste generalità, e prima di esporvi le proposizioni fondamentali dell' Elettro-fisiologia, devo dirvi una parola degli apparecchi di misura applicati a questi fenomeni.

Fino a questi ultimi tempi chi studiava l' Elettro-fisiologia si contentava di dire che la scossa prodotta dalla scarica della bottiglia, o dalla corrente, era stata più o meno forte, o che la rana si contraeva, o non si contraeva, si contraeva più, si contraeva meno. Oggi

abbiamo degli apparecchi di misura che si chiamano *Dinamometri*. Prendiamo un muscolo, per esempio, il gastrocnemio della rana, e fissiamolo con una estremità ad un gancio o ad una pinzetta; all' altra estremità pure con un gancio fissiamovi un piccolo peso di mezzo grammo o di un grammo. Quando si fa passare una corrente in questo muscolo, esso per un momento s' accorcia e solleva il peso. Ecco il *lavoro* della contrazione muscolare che si misura come per una macchina a vapore o per una cascata d' acqua, cioè col prodotto del peso per lo spazio o per l' altezza a cui quel peso fu sollevato. Bisogna dunque coi Dinamometri misurare sopratutto quest' altezza. Quando non si vuole che rendere il sollevamento più visibile, si fa come si faceva una volta negli apparecchi di fisica, cioè si rende quel movimento più esteso per mezzo di ruote o di leve. È un principio falso oggi abbandonato, e al quale è preferita la misura diretta che non altera quel movimento, e che si ottiene servendosi di cannocchiali muniti di micrometri. Per rendervi visibile in distanza il movimento di contrazione eccitato dalla corrente, uso qui una leva molto leggera a braccia assai disuguali. L' estremità del braccio lungo scorre sopra un quadrante diviso, e all' estremità del braccio corto è fissata la gamba della rana preparata: il pezzo di spina della stessa rana è superiormente fissato ad un altro uncino o ad una pinzetta. Quando fo passare la corrente pei nervi lombari i muscoli si accorciano, il braccio di leva corto si solleva e il braccio lungo si muove in senso contrario facendo una corsa che è 20 o 50 o 100 volte più grande di quella che fa il braccio corto, cioè nel rapporto delle loro lunghezze.

Questo movimento, come fra poco ve lo dirò, è molto rapido, e ad occhio nudo non si riescirebbe a fissare precisamente il punto a cui arriva l' indice nell' atto della contrazione. Perciò Breguet in un Dinamometro che mi costruiva molti anni sono, metteva davanti all' indice e in contatto di esso un indice leggero di avorio, il quale era spinto dinanzi a sè dall' indice stesso quando accadeva la contrazione, e rimaneva poi, quando questa era cessata, nel punto in cui era giunto. Ripeto, che per misure precise bisogna leggere direttamente l' inalzamento o l' accorciamento del muscolo. A questo fine si deve operare sopra un muscolo solo, e non sopra un insieme di diversi muscoli, come sono quelli che formano i membri di una rana, perchè, come ben sanno gli Anatomici, vi sono nel membro stesso alcuni muscoli che tendono a sollevare il membro, altri a restituirlo nella sua posizione, e di cui gli effetti in parte si neutralizzano. Per ottenere una misura esatta non basta di usare un muscolo solo, ma bisognerebbe che esso fosse formato di fibre tutte egualmente lunghe e parallele fra loro, e credo che un tal muscolo esista sotto la lingua della rana. Per la misura diretta si fissa inferiormente al muscolo un sottile cilindro metallico su cui sono fatte esattamente delle divisioni: si guarda a queste col cannocchiale munito di un micrometro e si giunge a misurare rigorosamente l' inalzamento prodotto dalla contrazione.

Dirò finalmente che per bene riescire nell'esperienza bisogna che il muscolo sia tenuto teso perchè si sollevi verticalmente: bisogna però che questo peso non ecceda un certo limite perchè non sia troppo stirato e alterata la sua struttura.

E per terminarc ciò che riguarda la misura della contrazione, vi dirò che siamo riesciti a determinare i tempi diversi corrispondenti alle varie fasi di questo movimento. Così, quando la corrente elettrica passa per il nervo, ci vuole un certo tempo perchè il nervo sia eccitato, poi bisogna che l'eccitazione scorra per il nervo e arrivi al muscolo; allora il muscolo si contrae, e dopo un istante, sempre molto breve, la contrazione cessa e il muscolo si rilascia.

Per determinare la durata della contrazione vi era un metodo ingegnoso che Watt ha applicato pel primo per misurare le velocità con cui si muovono gli stantufi delle macchine a vapore. È all'incirca questo stesso modo che ho usato in questa ricerca. Supponiamo di avere unito al muscolo che si solleva un pennellino disposto orizzontalmente e colla punta tinta d'inchiostro. Se questa punta fosse leggermente applicata sopra una carta, s'intende che quando il muscolo si contrae e s'innalza il pennello segnerebbe una linea retta sulla carta. Facciamo che quella carta sia un disco, il quale hà un moto uniforme di rotazione: s'intende subito che non avremmo più una linea retta disegnata, ma una linea curva, e che conoscendo la velocità di rotazione del disco si può dalla curva tracciata dedurre il tempo impiegato dal muscolo a sollevarsi. Infatti la lunghezza presa sull'asse, che i geometri chiamano delle *ascisse*, dal punto in cui il pennello comincia a segnare al punto che corrisponde normalmente al culmine della curva, determina il tempo che impiega il disco a fare questo intervallo, e questo tempo è quello stesso che corrisponde alla durata della contrazione.

Da molte esperienze risulterebbe che almeno nei primi istanti, quando il muscolo è molto vivo, la durata della contrazione è di 1|00 di secondo: l'intiera contrazione, cioè, il contrarsi e il rilasciarsi del muscolo, durerebbe 1|4 o 1|3 di secondo; ciò che significa che il periodo del rilasciamento del muscolo è molto più lungo del periodo della contrazione propriamente detta. Questa differenza è tanto grande, che se si usa una scarica piuttosto forte, il muscolo resta contratto e accorciato per molti minuti, e qualche volta per sempre.

Vi dirò per ultimo, che avendo una rana preparata in un dinamometro nel modo che vi ho mostrato, e usando per chiudere il circuito una ruota a denti, in parte metallici e in parte di legno, si può, facendo girare la ruota, alternare rapidissimamente il passaggio della corrente e l'interruzione della medesima nella rana. Allora vedete la rana contrarsi molte volte di seguito; se la ruota gira presto, cioè se i passaggi e le interruzioni della corrente sono molte e a piccolissimo intervallo di tempo l'una dall'altra, la rana rimane contratta e tetanizzata: se si gira adagio, si hanno le contrazioni distinte, ma diminuiscono d'intensità e non tardano a cessare. Allora per riaver le contrazioni bisogna lasciare il muscolo in riposo per qualche secondo.

Dopo d'avervi così dimostrati i migliori modi per esperimentare sugli effetti fisiologici della corrente elettrica, dobbiamo passare ad esporvi le leggi di questi fenomeni, lo che faremo nella lezione seguente.

LEZIONE SECONDA

(14 *aprile* 1861).

Mi sono studiato nella prima lezione di definire esattamente quei fenomeni che appartengono all'elettro-fisiologia e di distinguerli da altri attribuiti all'elettricità dei vegetabili e degli animali solamente per l'imperfezione delle nostre cognizioni. Hò insistito perciò sopra diversi esempi nei quali l'elettricità produce nell'organismo vivente effetti dipendenti o da azioni elettro-chimiche o da proprietà fisiche conosciute, e quindi indipendenti dallo stato di vita e dall'organismo propriamente detto.

Noi abbiamo visto che l'effetto principale dell'elettricità sugli animali consisteva nella scossa, cioè nel dolore e nella contrazione muscolare che la scarica o la corrente elettrica svegliavano traversando i muscoli o i nervi di un animale vivo o recentemente ucciso. Onde studiare più rigorosamente questo effetto elettro-fisiologico, io vi ho mostrato dei dinamometri destinati a misurare il lavoro muscolare, e descritto il modo di operare con questi apparecchi. Noi ci occuperemo oggi delle leggi dei fenomeni elettro-fisiologici, cominciando dal cercare di indagarne la natura.

Tutte le volte che si scarica una bottiglia di Leida per un arco metallico o per un conduttore liquido qualunque, tutte le volte che con uno di questi archi si chiude il circuito di una pila, i diversi fenomeni fisici o chimici che si producono dipendono dal tempo e dalla quantità d'elettricità che circola e che è la cagione dei fenomeni stessi. Così se la corrente passa attraverso alla soluzione di acido solforico di un voltaimetro, se essa è costante, la quantità d'acqua che è decomposta, e la quantità di zinco che è ossidata nella pila, sono proporzionali al tempo, cioè alla quantità di elettricità che passa. E se il circuito invece di essere chiuso costantemente fosse alternativamente chiuso e aperto per mezzo di una delle solite ruote d'interruzione avente i denti metallici della stessa lunghezza di quella degli intervalli isolanti, si troverebbe che nel circuito chiuso continuamente e in quello interrotto, le quantità d'acqua decomposte nello stesso tempo stanno come 1 a 1|2. Anche il riscaldamento dei conduttori percorsi dalla corrente o dalla scarica dipende dalla quantità d'elettricità che passa nell'unità di tempo, cioè dall'intensità della corrente; e così deve dirsi dell'azione che ha il conduttore voltiano sull'ago magnetico e della proprietà di calamitare il ferro dolce.

Non è così dell'azione elettro-fisiologica. Sia che si chiuda il circuito di una pila colle mani bagnate, sia che si faccia passare la corrente attraverso a una rana preparata, cioè nei muscoli soli o nei nervi soli o nei nervi e muscoli della rana o di un animale qualunque vivo o ucciso di fresco, sempre si verifica che la contrazione e il dolore si producono al primo momento quando

l'elettricità comincia a passare e che nulla si prova o si osserva più finchè il circuito sta chiuso. Non è dunque la quantità d'elettricità, non è, quasi si potrebbe dire, il passaggio della corrente nei nervi e nei muscoli che determina quelli effetti. Se invece di tener chiuso il circuito in cui la rana è compresa, dopo un certo tempo s'interrompe il passaggio dell'elettricità, allora si manifestano di nuovo i segni del dolore e la contrazione. E se per queste chiusure ed aperture del circuito si adopera una ruota di interruzione, si vedrà successivamente la rana contrarsi e rilasciare i muscoli ad ogni passaggio o ad ogni interruzione di corrente. Se queste alternative sono molto rapide la rana è presa da contrazioni tetaniche, le quali non tardano a distruggere la potenza nervosa e ad uccidere l'animale. È in questo modo che con certi apparecchi d'induzione si può dare anche con una corrente debolissima una serie di scosse ripetute e che uccidono degli animali grossi e robusti. Anche questo effetto non è dovuto alla quantità dell'elettricità, ma piuttosto alla variazione dello stato elettrico che accade nei nervi e nei muscoli di un animale vivo al momento dell'apertura e della chiusura di un circuito voltaico. Questo stato variabile della tensione elettrica di un conduttore voltiano che fu ammesso sin qui dai fisici come una conseguenza della famosa teoria di Ohm della pila, è messo oggi fuori di dubbio dalle esperienze fatte sopra i lunghi fili telegrafici. Quando si chiude il circuito di una pila toccando i suoi poli con un arco conduttore, s' intende che lo stato elettrico e quindi il flusso dell'elettricità non giunge in tutti i punti e nello stesso istante a quel grado permanente a cui arriva dopo un

certo tempo, che è piccolissimo, ma che pure è stato misurato operando nei lunghi circuiti telegrafici. Sappiamo oggi che in un circuito lungo 500 o 600 chilometri di filo di ferro, fra il momento in cui è chiuso il circuito e il momento in cui l'intensità della corrente elettrica è sensibilmente costante in tutti i punti, vi è un intervallo di tempo, che fu trovato di 15 a 18 millesimi di secondo. È questa la durata del così detto stato variabile, il quale, secondo la natura dei circuiti e secondo gli apparecchi che danno la scarica elettrica, dura più o meno lungamente. L'azione elettro-fisiologica sembra dipendere dalla velocità con cui lo stato elettrico permanente si stabilisce nei nervi o nei muscoli dell'animale vivo: quanto meno dura quello stato variabile, tanto più l'effetto elettro-fisiologico è grande. Noi sappiamo che nelle scariche della bottiglia di Leida o nelle scintille della macchina elettrica la quantità d'elettricità è estremamente piccola. Paragonando il calore sviluppato in un filo di platino da una scarica di una batteria di Leida, che dura un istante estremamente piccolo di tempo, forse meno di 1|24000, a quello ottenuto da una piccola pila con cui il riscaldamento di quel filo dura molti minuti, siamo così arrivati a concludere, se non con rigore assoluto, ma di certo con molta probabilità, che la quantità di elettricità svolta da quella pila, proporzionale alla piccolissima quantità di zinco ossidato, è molte volte maggiore di quella che costituisce il fulmine e le scariche di un grosso temporale.

Noi sappiamo oggi, se non misurare la durata piccolissima di una scintilla elettrica, almeno determinare il limite, cioè il numero anche minore di quello che rappresenta la durata effettiva della scintilla.

Non mi sò trattenere dall'accenarvi almeno questo principio ingegnosissimo della misura degli intervalli piccolissimi di tempo, principio che corregge certe indicazioni, che per la persistenza delle immagini sulla retina prendono per noi apparenza false. Quando un corpo ruota con una certa velocità, noi invece di vederlo nei punti successivi che occupa lo vediamo in forma di anello continuo, perchè l'occhio nostro conserva l'impressione del corpo in una certa posizione anche per un piccolo tempo, circa un decimo di secondo, dopo che il corpo non vi è più: quindi se esso compie una rotazione più presto che 1|10 di secondo è chiaro che vedremo l'apparenza dell'anello, perchè il corpo tornerà al punto in cui era prima che l'impressione sia cessata per l'occhio.

Questa apparenza non si verifica più se il corpo e il nostro occhio sono illuminati da una luce che dura un intervallo di tempo molto più piccolo di quello della rotazione del corpo. È appunto il caso della scintilla elettrica, di cui la durata è stata misurata col principio che vi ho accennato, ed è stata trovata minore di $\frac{1}{24000}$ di secondo. Una corda che ci sembra ingrossata quando vibra, l'insetto che ci pare più grosso quando batte le ali, la vena liquida che ci pare continua, tutte queste sono illusioni e cessano se questi corpi sono illuminati colla scintilla elettrica.

Or bene: la scintilla che dura un tempo piccolissimo e che è dovuta ad una quantità piccolissima d'elettricità, almeno rispetto a quella che si produce in una pila, dà scosse fortissime, cioè dolori e contrazioni violentissime.

Eccovi una rana preparata, che metto a cavallo dello

scaricatore universale; prendo una piccola bottiglia di Leida e dopo averla caricata la scarico due, tre o quattro volte di seguito con un arco metallico, sicchè non solo non ho più scintille, ma accostando la bottiglia a un elettroscopio delicatissimo non ho più alcun segno d'elettricità; eppure, come lo vedete, la rana si contrae molte volte di seguito, quando scarico la bottiglia nel modo solito attraverso di essa.

Non è dunque, lo ripeto ancora, dalla quantità assoluta d'elettricità che dipende l'effetto elettro-fisiologico, ma piuttosto dalla durata dello stato elettrico variabile del circuito in cui sono i nervi della rana. È questa durata che a quantità uguale d'elettricità è più piccola nel caso della scarica della bottiglia che per la corrente voltiana. È così che s'intendono gli effetti fisiologici tanto intensi della scarica della bottiglia o delle correnti indotte.

Queste considerazioni hanno condotto alcuni Fisici a scorgere una certa analogia fra gli effetti elettro-fisiologici e l'azione che ha la corrente di sviluppare correnti indotte quando comincia e cessa di agire. Per rappresentarci quasi meccanicamente, e forse non tanto lontani dal vero, come avvenga l'eccitazione di un nervo sotto l'elettricità, possiamo supporre che avvenga allora in quel nervo quello che avviene in una massa di ferro dolce od anche in certi corpi trasparenti sotto l'azione di una forte corrente elettrica; è un nuovo equilibrio molecolare che in un caso accompagna il nuovo stato magnetico, e che nell'altro dà al corpo la proprietà di fare ruotare il raggio polarizzato. L'eccitazione del nervo, cioè la facoltà di far contrarre il muscolo in cui si pro-

paga, consisterebbe o almeno sarebbe accompagnata necessariamente da un nuovo stato molecolare, e l'eccitazione del nervo e l'effetto fisiologico dipenderebbero dal passaggio da uno stato molecolare del nervo ad un altro svegliato dall' elettricità e dalla rapidità più o meno grande con cui si compie.

Io credo importante di continuare in queste considerazioni, usando, per svegliare le contrazioni muscolari, invece della scarica della bottiglia, di cui è impossibile di conoscere la quantità d'elettricità, la corrente elettrica di una pila, fatta passare per un tempo brevissimo nei nervi della rana preparata. In questa esperienza noi possiamo conoscere la durata della corrente e quindi la quantità di zinco che si ossida nella pila in quel tempo, e la quantità del lavoro muscolare che l'eccitazione elettrica del nervo produce. Questo studio condurrà a delle conseguenze molto importanti sulla natura dell' eccitamento elettrico dei nervi. L'esperienza è presto disposta. Prendo una pila formata di elementi piccolissimi immersi nell'acqua di pozzo, di platino e zinco ammalgamato, perchè non si ossidi altro che quando il circuito si chiude. Nel circuito di questa pila metto una rana preparata e fissa nel dinamometro, e un galvanometro.

Questo circuito è interrotto in un punto per essere le due estremità formate da due molle di acciaio o di ottone tenute molto vicine, ma senza però toccarsi. Se si prende una striscia d' ottone e con essa si toccano assieme le due molle, si vedrà in quel momento la rana che si contrae e deviare l' ago del galvanometro. Per ottenere che questo contatto metallico fra le due molle duri un tempo piccolissimo, ma pur misurabile, cioè che

la corrente duri un intervallo piccolissimo, ma noto, basta di avere un gran rotone di legno e di fissare la striscia d' ottone sull' orlo del rotone stesso. Supponiamo che il rotone abbia tre metri di diametro, che faccia un giro in un terzo di secondo, e che la striscia di ottone sia grossa un millimetro. È evidente che se mentre il rotone ha quella velocità si mandano le due molle contro il suo orlo, allorquando esse toccano la lastra di ottone vi sarà la chiusura del circuito e la corrente passerà per un intervallo di tempo che sarebbe in quelle condizioni di $\frac{1}{9000}$ di secondo. Cominciate dal notare che mentre la rana si contrae come se il circuito rimanesse chiuso per un tempo qualunque, l' ago del galvanometro non devia, ciò che vuol dire che la rana è un istrumento più sensibile per le scariche elettriche e per le variazioni brusche dell'elettricità e che durano un istante piccolissimo di tempo, dell' ago del galvanometro, il quale ha una certa inerzia ed ha bisogno che l' azione della corrente duri un certo tempo per muoversi. Intanto, supponendo di ripetere più volte il passaggio della corrente perchè diventi sensibile la quantità di zinco che si ossida nella pila, o tenendo chiuso il circuito per un dato tempo, si può arrivare a misurare con esattezza quale è la quantità di zinco ossidata nella pila durante quella breve chiusura del circuito, cioè quella quantità di elettricità che passando in quel tempo piccolissima produce una certa contrazione, misurata, come vi dissi nella prima lezione, dal prodotto del peso sollevato dal muscolo per l' altezza del sollevamento.

Noi abbiamo così dedotto dall' esperienza e con una

certa esattezza due numeri, fra i quali un legame intimo deve esistere: è, guardando all' ingrosso, il legame di causa ad effetto. Infatti, questi due numeri sono la quantità di zinco ossidato nella pila, ossia la quantità d'elettricità prodotta, e il lavoro meccanico che rappresenta la contrazione muscolare svegliata da quell' elettricità.

Per farvi intendere bene questo legame sono costretto ad esporvi brevissimamente una delle più belle invenzioni della Fisica moderna, cioè la così detta teoria meccanica del calore.

Il solo buon senso, e anche l' osservazione un po' accurata dei fatti fisici che costantemente si producono davanti a noi, attesta un principio che la meccanica razionale ha dimostrato *a priori*; è il principio delle forze vive. Insomma, in natura non si crea nè materia nè forza, e per conseguenza non si distrugge nè materia, nè forza. In ogni macchina, che è in azione, vi è sempre una forza motrice e una resistenza da vincere, e se non si vuole ammettere l' assurdità del moto perpetuo bisogna ben concludere che il così detto lavoro motore e il lavoro della resistenza devono essere eguali fra loro nello stesso tempo. Quando per mezzo di una leva a braccia disuguali noi vediamo un piccolo peso applicato all' estremità del braccio lungo far equilibrio ad un peso molto più grande applicato all' estremità di un braccio più corto, ci possiamo per un momento far illusione; ma in realtà se mettiamo in moto la leva, si vedrà subito verificato il principio che abbiamo detto, cioè che il prodotto del braccio della leva per il peso sarà uguale da una parte e dall' altra, ciò che vuol dire che il peso più grande percorrerà uno spazio tanto più piccolo di quello

percorso dall' altro peso minore, appunto nel rapporto dei pesi.

Benchè queste verità fossero dimostrate nella Meccanica razionale, sembravano quasi dimenticate nella Fisica e nella Meccanica sperimentale. Nell' urto dei corpi, quando un corpo cade da una certa altezza sulla terra, quando un corpo si muove in mezzo all' acqua, in tutti i casi di pressione, di resistenza, di attriti, ci contentavamo di dire che le forze si disperdevano in movimenti vibratori, si diffondevano via via in grandi masse, come se quasi si annientassero. Invece tutti questi casi non sono che esempi di trasformazioni di forze, cioè di forza viva che si trasforma in calore, e viceversa di calore che si trasforma in forza viva. Da un gran numero di esperienze concordi fu trovato un numero che si chiama l' *equivalente del calore*. Questo numero, che è circa 420 chilogrammi-metri, significa che quando 420 chilogrammi cadono da un metro di altezza sul suolo, questo movimento o piuttosto questa quantità di lavoro non si estingue, ma si converte in una quantità di calore capace di riscaldare di un grado centigrado un chilogrammo d'acqua, e che viceversa questa quantità di calore può trasformarsi in un lavoro meccanico espresso da 420 chilogrammi-metri.

Voglio mostrarvi almeno un' immagine dell' esperienza che incontestabilmente dimostra la trasformazione della forza viva in calore e che al genio di Davy è dovuta. In una stagione molto fredda, in cui la temperatura dell' aria era inferiore a 0° di molti gradi, Davy immaginò di far ruotare due dischi di ghiaccio in contatto l' uno dell' altro. Naturalmente, per produrre questa

rotazione era necessaria una forza maggiore quando i due dischi si toccavano, ed allora si vedevano i due dischi in parte fondersi e convertirsi in acqua. Il calore così sviluppato non poteva essere altro che la forza viva consumata nell' attrito. Un altro splendido esempio di quella trasformazione si opera costantemente in natura; l' acqua che cade dalle nubi e che dai monti scende al mare producendo tante quantità di lavoro, non è altro che calore solare trasformato.

Una volta ammesso questo principio, si è dovuto necessariamente estenderlo anche alla pila e ai motori elettro-magnetici, e finalmente anche alle macchine animali. L'azione chimica che ha luogo nel seno della pila è una combustione, e sia che avvenga senza sviluppo di corrente, sia che avvenga quando vi è corrente, la quantità di calore sviluppato sarà sempre costante e solo la sede ne sarà cambiata, perchè la corrente trasporta quel calore nelle varie parti del circuito. Abbiamo qui un motore elettro-magnetico, ossia una macchina che produce una certa quantità di lavoro, e nella quale si brucia una certa quantità di zinco: si trova che quando la macchina non lavora, si sviluppa nel circuito e nella pila più calore che quando lavora, e che giusta la differenza equivale al lavoro prodotto secondo il numero che abbiamo dato.

Premessa questa digressione necessaria per la conclusione che vogliamo trarre dalle nostre esperienze elettro-fisiologiche, è tempo che torniamo all'esperienza fatta colla rana.

Io ho detto che si poteva determinare la quantità, benchè piccolissima, di zinco che si ossidava in quel-

l'istante piccolissimo, in cui il circuito colle due molle stava chiuso. Facendo con diligenza quest'esperienza si può sapere il lavoro meccanico prodotto dalla contrazione della rana, cioè il prodotto del peso sollevato per l'altezza. Si può dunque fare l'applicazione della teoria meccanica del calore a questo caso, cioè cercare se lo zinco consumato in quell'istante svolge una quantità di calore, e quindi una quantità di lavoro meccanico equivalente o uguale a quello prodotto dal muscolo. In questo calcolo si ammette che la corrente che eccita il nervo, tutta intera si trasformi in contrazione muscolare, e in realtà non è così, perchè tutto il circuito voltacio si riscalda, e nell'atto della contrazione anche il muscolo si riscalda. In conclusione, facendo quel calcolo, si dovrebbe trovare che il lavoro meccanico della contrazione, è, secondo la teoria, quello stesso dato, od anzi un po' minore di quello equivalente al calore svolto dallo zinco ossidato nella pila. Invece, dai numeri dedotti di esperienze rigorose si giunge ad un risultato contrario; il lavoro prodotto dalla contrazione muscolare è almeno venticinque o trenta mila volte maggiore di quello che corrisponderebbe, secondo la teoria meccanica del calore, alla quantità di zinco o alla corrente che ha eccitato il nervo.

Questo risultato ci ha condotto necessariamente ad una conclusione che fu luminosamente confermata dall'esperienza, e che rischiara molto le nostre idee sulle proprietà dei nervi. Per interpretare quel risultato bisognava supporre che la corrente elettrica che eccita un nervo agisce come la scintilla di fuoco che infiamma una gran massa di polvere, o come un piccolo sforzo che fa cadere da una grande altezza un masso soste-

nuto nello stato d'equilibrio instabile. Bisogna insomma supporre che la corrente elettrica eccita il nervo, e che il nervo eccitato sveglia istantaneamente nel muscolo delle azioni chimiche che, per una catena ancora sconosciuta, si trasformano o in calore, o più probabilmente in elettricità, e finalmente in lavoro meccanico: in una parola, le azioni chimiche necessarie per spiegare il lavoro muscolare sono nel muscolo, è nel muscolo che si producono e che si consumano, svegliate dall'eccitazione del nervo.

Si sapeva che un muscolo esposto all'aria assorbiva dell'ossigene ed esalava dell'acido carbonico: si sapeva pure che l'esercizio del corpo accresceva i fenomeni chimici della respirazione polmonare.

Sono contento di potervi mostrare con un'esperienza semplice e palpabile, che la contrazione muscolare è accompagnata da un aumento negli atti chimici della così detta respirazione del muscolo, cioè, maggior assorbimento di ossigene, maggiore esalazione di acido carbonico. Eccovi due boccie di vetro della stessa capacità, cioè di circa 100 centimetri cubici l'una. L'apertura è chiusa da un turacciolo di sughero attraverso del quale passano due fili di ferro o di rame che si piegano orizzontalmente nell'interno della boccia in modo da lasciare fra loro un intervallo di 20 a 25 millimetri. Preparo rapidamente dieci rane alla Galvani, e ne sospendo cinque per boccia ai fili metallici, introducendo le due estremità dei fili stessi, l'una nel pezzo di spina e l'altra nella parte inferiore del bacino. Tutto dev'essere egualmente preparato nelle due boccie, e la differenza deve solamente consistere nel riunire i due fili di una boccia alle

estremità di un apparato elettrico, per cui in quattro o cinque minuti sveglio il maggior numero possibile di contrazioni nelle cinque rane di essa, mentre le cinque dell'altra boccia stanno in riposo. Dopo questo tempo, levo prontamente i tappi di sughero e le rane, e richiudo le boccie col tappo di vetro. Per scoprire e misurare le differenze della composizione dell'aria che si sono prodotte nelle boccie, dovrei farvi, come in fatti fu fatto, un'analisi eudiometrica rigorosa: ma questa non è possibile mentre si dà lezione, e perciò devo limitarmi a mostrarvi in un modo grossolano, ma ben evidente, che nel vaso, in cui le rane si sono contratte, vi è molto più acido carbonico, che nel vaso in cui i muscoli sono stati in riposo. Perciò verso prontamente la stessa quantità, 10 centimetri cubici d'acqua di calce, nei due vasi ed agito. Nel vaso della contrazione si produce un grande intorbidamento, e quindi una quantità di carbonato di calce molto più grande che nell'altro vaso in cui l'acqua di calce appena s'imbianca.

Nè si deve credere che tutto l'acido carbonico svolto dalla respirazione muscolare si sia esalato al di fuori.

Se mettessi dei muscoli dopo una lunga e ripetuta contrazione in un atmosfera di gaz idrogeno o nel vuoto, come infatti feci alcuni anni sono, troverei che essi esalano una grande quantità di acido carbonico. Bernard analizzando i gaz del sangue che traversa un muscolo dopo una lunga contrazione, trovò che non vi era più traccia di ossigene e che quasi tutto il gaz era acido carbonico. Perciò si può dire che la causa immediata della stanchezza di un muscolo è un asfissia, dovuta alla scomparsa dell'ossigene tanto dell'aria che del sangue e alla presenza dell'acido carbonico che vi si è sostituito.

Forse il giorno non è lontano in cui la Chimica ci dirà quali sono i prodotti immediati della maggior combustione che avviene in un muscolo per la contrazione: non è solo sul carbonio che l'ossigene si fissa; l'acido carbonico è un ultimo termine, e vi saranno forse in quel muscolo anche degli acidi fissi che si producono. Infatti Dubois Reymond ha provato che la reazione acida cresce nei muscoli dopo la contrazione e che la differenza non scompare tenendo i muscoli nel vuoto per far esalare l'acido carbonico.

Devo anche farvi notare che il lavoro meccanico della contrazione non è tutta la forza che si sveglia in un muscolo in quell'atto. Vedremo più tardi che si sviluppa dell'elettricità. Qui voglio farvi vedere che si sviluppa anche calore in un muscolo in contrazione. Bequerel non aveva messa questa verità in evidenza perchè operava sopra un un animale intero e vivo, per cui accadeva che nell'atto della contrazione il sangue accorreva nei muscoli, e a questo concorso si attribuiva l'innalzamento di temperatura.

Eccovi la prova diretta del riscaldamento di un muscolo per pura contrazione ottenuta sopra una rana preparata e quindi senza sangue. Prendo due coppie terme-elettriche, di bismuto ed antimonio disposte in modo che i metalli dello stesso nome comunichino assieme; i due bismuti, per esempio, sono messi in comunicazione assieme e i due pezzi d'antimonio sono uniti rispettivamente alle due estremità di un galvanometro. Per questa disposizione se le due coppie sono riscaldate alla stessa temperatura non vi è corrente prodotta, nè deviazione nell'ago: ma se una delle due coppie è un po' più calda dell'altra, vi è subito una corrente, che chiamiamo differenziale. È in questo modo solo

che si riesce a far presto e bene un'esperienza di confronto di questo genere.

Veniamo alla esperienza sulle rane.

Se ne preparano due alla Galvani e in una delle coscie di una di esse s' introduce una coppia termo-elettrica e l' altra coppia si mette nella coscia dell' altra rana. Si aspetta che l'equilibrio di temperatura sia bene stabilito e che l' ago stia a zero e allora si fa contrarre una delle rane; all' istante l' ago devia, come se fosse riscaldata col contatto di un corpo caldo la coppia termo-elettrica che è immersa nella coscia della rana che si contrae. Dunque la contrazione pura e semplice di un muscolo svolge calore.

Tutte queste considerazioni, nelle quali mi sono forse troppo diffuso, conducono necessariamente a questa conclusione molto importante per la teoria dei fenomeni elettro-fisiologici: « l'eccitazione di un nervo per mezzo di « una corrente, come fa l'accensione di una massa di pol- « vere con una scintilla, dà origine nel muscolo a feno- « meni chimici, cioè accresce la così detta respirazione « muscolare: è fra questi fenomeni chimici e il lavoro « meccanico della contrazione, tenendo anche conto dello « svolgimento di calore, che deve verificarsi e si verifica in- « fatti la relazione voluta dalla teoria meccanica del calore ».

Ecco il progresso importante che questa parte dell' Elettro-fisiologia ha fatto in questi ultimi tempi.

Rimane ora un gran mistero a scoprire, come cioè dagli atti chimici della respirazione muscolare si passi alla contrazione del muscolo, per qual catena questa trasformazione avvenga. Non è di certo mia intenzione di mostrarvi con una esperienza come le cose procedono

in un muscolo, ma solo di farvi meglio intendere con una esperienza in che anzi risiede questo mistero. Eccovi una grossa spirale elettro-dinamica nell' interno della quale ho sospeso un pezzo di molla o saltaleone di ferro dolce. Questa molla è fissa in alto ed inferiormente è unita ad un filo di seta che si avvolge attorno ad una carrucola molto delicata. Attorno alla stessa carrucola si avvolge in senso contrario un filo di seta che porta un peso che stira fino ad un certo punto la molla. Finalmente nell' asse della carrucola è fissato un lungo indice d' avorio o di paglia. Tutte le volte che una corrente elettrica passa nella spirale la molla di filo di ferro si accorcia, le sue spire si avvicinano e l' indice indica il sollevamento del peso; quando la corrente elettrica cessa, il peso cala e l' indice si muove in senso contrario. È precisamente lo stesso gioco che avete visto fare da un muscolo sospeso nel dinamometro quando la corrente comincia ad agire e quando cessa. Nell' esperienza che vi mostro ora, la corrente della spirale magnetizza la spirale di filo di ferro, e gli elementi così magnetizzati si attirano fra loro; è un effetto conosciuto, regolato da leggi note: la corrente elettrica nasce nella pila dove c' è dello zinco che si ossida. Anche nel muscolo questa ossidazione vi è, vi è del carbonio che si combina coll' ossigene e brucia, e per quest' azione chimica vi è calore e quindi forza sviluppata. Ma quali sono gli elementi muscolari corrispondenti agli elementi magnetici; con quali leggi e precisamente con quale forza questi elementi si muovono per produrre la contrazione? Qui stà il mistero o piuttosto uno dei più bei problemi

che la Fisica e la Chimica aiuteranno un giorno la Fisiologia a risolvere.

Dopo queste cognizioni generali sul meccanismo della contrazione muscolare eccitato dal passaggio della corrente elettrica nei nervi, ci occuperemo nella lezione prossima a studiare le relazioni esistenti fra questi effetti elettro-fisiologici, e la direzione della corrente, la sua intensità, il senso in cui percorre i nervi.

LEZIONE TERZA

(25 aprile 1861)

Ho impiegata, e spero non inutilmente, tutta l'ultima lezione per esporvi quelle esperienze e quelle considerazioni generali che ci danno un'idea del meccanismo con cui l'elettricità agendo sui nervi e sui muscoli giunge a produrre la contrazione muscolare. A differenza di ciò che avviene per gli effetti chimici, calorifici, magnetici della corrente elettrica, i quali dipendono dalla quantità d'elettricità e dalla durata della sua azione, gli effetti elettro-fisiologici non si manifestano che durante quelle variazioni di stato elettrico che hanno luogo al chiudere ed all'aprire del circuito, cioè in quell'intervallo piccolissimo di tempo, che mette un conduttore qualunque percorso dall'elettricità, a passare dallo stato naturale allo stato di equilibrio elettro-dinamico e viceversa: indipendentemente dalla quantità di elettricità, l'azione elettro-fisiologica è proporzionale alla velocità con cui questo stato variabile del principio e della fine della corrente si produce, e ciò spiega come le piccolissime scintille o scariche della bottiglia di Leida agiscono fortemente sui

?

Correggasi: indipendentemente, fino ad un certo limite, dalla quantità d'elettricità.

C. Matt.

nervi e sui muscoli e come la loro azione si diminuisce o si estingue facendo passare queste scariche lentamente attraverso a conduttori molto lunghi e imperfetti.

Allorchè la quantità d'elettricità e la velocità della scarica si uniscono, è allora che si hanno, come dal fulmine, gli effetti elettro-fisiologici più violenti.

Ricorderemo ancora che l'eccitazione elettrica del nervo non determina la contrazione muscolare se non risvegliando preventivamente gli atti chimici della respirazione muscolare.

Noi dobbiamo ora occuparci delle leggi dell'elettro-fisiologia, cioè delle relazioni che esistono fra gli effetti fisiologici e la direzione della corrente elettrica nei nervi, l'intensità, la durata della corrente, le proprietà fisiologiche dei nervi, ecc. ecc.

Poche sono le parti della fisica delle quali, come di questa, si siano tanto occupati gli sperimentatori, e pur troppo sono poche le cognizioni rigorose e generali a cui siamo giunti. Perciò avrò cura di esporvi, non già tutto quello che si sa o si crede sapere sopra questa materia, e che è più o meno affermato, più o meno contraddetto in generale, ma solamente quelle poche proposizioni che ben si dimostrano coll'esperienza e sulle quali non vi è contestazione.

Il primo studio che noi faremo sarà sull'effetto elettro-fisiologico diverso che ha la scarica o la corrente elettrica secondo la direzione con cui percorre i nervi.

Sapete già che per direzione della corrente s'intende la direzione con cui si muove nell' arco interpolare il fluido positivo svolto dall' azione chimica che soffre lo zinco e che è diffuso nel liquido. In una bottiglia di Leida di

cui l'armatura interna sia carica di elettricità positiva e l'esterna di negativa, la scarica si dice pure diretta dall'armatura interna all'esterna nell'arco interpolare. Parlando della corrente trasmessa nei nervi, s'intende che essa può propagarsi dai centri nervosi alle estremità dei nervi, nel qual caso si chiama *diretta, discendente* o *centrifuga*, oppure propagarsi dalle estremità ai centri nervosi, chiamandosi allora *corrente inversa, ascendente* o *centripeta*.

Ciò posto, eccovi una prima proposizione: *nei nervi misti, il primo e il solo effetto che si ottiene è la contrazione prodotta nel momento in cui la corrente diretta o discendente, ridotta la meno intensa possibile o la più lenta nel propagarsi, comincia a passare. Accrescendo l'intensità della corrente o la velocità della scarica, il secondo effetto elettro-fisiologico che insorge è la contrazione eccitata, all'aprirsi del circuito, dalla corrente inversa o ascendente: crescendo ancora l'intensità della corrente insorgono le contrazioni negli altri due istanti, cioè quando la corrente diretta cessa e quando l'inversa comincia ad agire. Questi diversi fenomeni così definiti abbracciano fino a un certo punto i noti periodi elettro-fisiologici di Ritter e di Nobili, i quali si riducono principalmente ad avere nei primi istanti, e quando l'eccitabilità del nervo è ancora molto grande, contrazione tanto all'aprire quanto al chiudere del circuito, qualunque sia la direzione della corrente nel nervo, e in un periodo successivo di minore eccitabilità in cui non vi è più che la contrazione al chiudersi del circuito colla corrente diretta e la contrazione all'aprire coll'inversa.*

Non starò qui a descrivervi tutti i diversi modi con cui si è operato per stabilire sperimentalmente questa proposizione. Mi limito a farvi vedere quello che meglio riesce, accennandovi anche brevemente, quando mi capiterà, le varie cagioni d' errore che s' incontrano negli altri modi di sperimentare.

La nostra esperienza consiste nel preparare la rana alla maniera di Galvani, nel toglierle i muscoli e le ossa del bacino, e nel tagliare la sinfisi del bacino stesso. In tal modo la rana è ridotta ai due membri superiori, che non sono più riuniti fra loro che per mezzo dei nervi lombari riuniti a un pezzo di spina. S' intende facilmente, che toccando una delle estremità della rana, o il nervo corrispondente con un polo della pila e l'altro membro o il suo nervo coll'altro polo, avremo nel tempo stesso e sullo stesso animale uno dei nervi percorso dalla corrente diretta e l'altro dalla corrente inversa.

In questo modo s' intende che è più sicuro e più esatto il paragone degli effetti sviluppati dalla corrente secondo la sua direzione nei nervi; imperocchè è la stessa corrente che passa nello stesso tempo nei due sensi in due nervi simili dello stesso animale. Il nervo non è alternativamente sottoposto alla corrente in direzioni contrarie; finalmente è ben nota la direzione in cui i nervi sono percorsi dalla corrente, cosa che non è più quando si applicano i poli della pila sopra un nervo messo allo scoperto in un animale e circondato da tutte le parti dai muscoli. Infatti sappiamo che quando si immergono i poli di una pila in una massa liquida molto estesa, o si toccano coi due poli due punti di una lastra metallica estesa, l'elettricità si distribuisce in tutti i punti di

quei conduttori, formando come tanti filetti che a guisa di fiocchi irraggiano dai punti toccati dai poli.

Nel caso nostro non bisogna dimenticare che per questa diffusione della corrente può accadere che mentre il nervo è percorso fra i due poli da una corrente diretta dal polo positivo al negativo, vi sia al di là dei poli, nel nervo stesso, un'altra porzione di corrente che si chiama *derivata*, di senso opposto e che può avere un effetto maggiore della prima. Per rappresentarci questo caso supponiamo di avere un pezzo di filo o di spago leggermente inumidito piegato ad ∩ rovesciato, e che colle estremità sole tocchi un piano molto buon conduttore, come sarebbe una lastra metallica. Allorchè applico due poli della pila sul pezzo di spago, ognuno intende che l'elettricità per neutralizzarsi si dividerà in due parti, cioè in una porzione che traversa lo spago fra i due poli e in un'altra porzione che gira al di fuori e che incontrando nella lastra un conduttore molto migliore dello spago può essere anche maggiore della prima. Ciò che a noi più importa di notare è che se la corrente nel tratto intermedio del nervo fra i due poli sarà, per esempio, *diretta*, nei tratti laterali del nervo stesso essa sarà *inversa*. Da ciò la confusione che può nascere facendo una esperienza in queste condizioni per ben giudicare degli effetti dovuti alla direzione della corrente.

Ripigliamo la rana tagliata a metà, e nella quale faremo passare la scarica della bottiglia da un membro all'altro o da un nervo ad un altro, distendendola sopra i due bracci metallici dello scaricatore universale. Ricorro alla piccola bottiglia di Leida che già vi ho mostrata altre volte, e che dopo aver caricata con pochi giri della

macchina scarico due o tre volte prima con un arco metallico. Ridotta così a non dare più segno d'elettricità a un elettroscopio, la scarico attraverso alla rana distesa, e se la carica è ridotta la più piccola possibile, vedete per due o tre volte di seguito contrarsi quel solo membro che comunica coll'armatura esterna, cioè quello di cui il nervo è percorso dalla scarica diretta. Usando la scarica della bottiglia noi non possiamo tener conto che del primo effetto, benchè in realtà questa debba comporsi di due fasi opposte che si succedono immediatamente. Anche colla induzione, cioè generando una corrente indotta, come coll'effetto fisiologico, la scarica della bottiglia agisce in quella fase sola che corrisponde alla chiusura del circuito nel caso della pila.

Sostituiamo alla bottiglia la pila, usando però la corrente la più debole possibile. A questo fine prendo un tubo di vetro di 3 o 4 millimetri di diametro interno, lungo un metro, e che è ripiegato ad U colle estremità, e fissato sopra una tavoletta di legno.

Si riempie questo tubo di acqua distillata, e immergendo più o meno nella colonna liquida i reofori metallici della pila si ottiene di avere nel circuito una grande resistenza, variabile secondo la lunghezza della colonna. Preparata la rana al modo solito e distesa sopra i due fili dello scaricatore in modo che la corrente la percorra da un membro all'altro, si ha che uno dei nervi è percorso dalla corrente diretta e l'altro dall'inversa. Comincio dall'usare la colonna d'acqua la più lunga possibile, in modo che o per l'intensità molto diminuita, o per la lentezza con cui lo stato elettrico permanente si stabilisce, nessuno dei membri della rana si contrae nè all'aprire

nè al chiudere del circuito. Accorcio via via la colonna d'acqua e la prima contrazione che insorge è costantemente quella del membro di cui il nervo è percorso dalla corrente diretta nell'atto della chiusura. Continuo ad accorciare la colonna liquida, cioè ad accrescere la intensità della corrente e una seconda contrazione sopraggiunge, quella cioè del membro percorso dalla corrente inversa all'apertura del circuito. Se si continua ad accrescere la corrente, si mostrano le altre due contrazioni quasi nello stesso istante, cioè al chiudere nel membro percorso dalla corrente inversa, e all'aprire nell'altro percorso dalla corrente diretta. Proseguendo a sperimentare sulla stessa rana vi posso mostrare che diminuendo di nuovo la corrente si ripassa per la stessa successione di fenomeni ottenendo alla fine colla corrente la più debole la sola contrazione nel membro percorso dalla corrente diretta e alla chiusura.

Questi effetti si trasformano nei periodi di Ritter e di Nobili, usando fin da principio una corrente intensa. Allora vedete da prima i due membri della rana contrarsi contemporaneamente tanto al chiudere quanto all' aprire del circuito. Ma poi, sia che i nervi perdano di eccitabilità naturalmente, sia che questa perdita venga affrettata dal passaggio della corrente e dalle contrazioni svegliate, si giunge, dopo 20 o 30 minuti, più o meno, secondo la forza della corrente e la vitalità dell' animale, ad avere i fenomeni del così detto secondo periodo, che corrispondono a quelli che abbiamo ottenuto usando il nervo intatto e la corrente molto debole. Dove l' eccitabilità del nervo è diminuita occorre che la corrente sia forte: quando invece il nervo è molto eccitabile occorre una corrente molto debole.

Da questa esposizione rimane stabilito che il primo fenomeno elettro-fisiologico, il più semplice, il più generale di tutti, è l'eccitazione del nervo al principio della corrente diretta.

Anche col dinamometro si verifica che una data corrente diretta sveglia al principio della sua azione il massimo sforzo muscolare.

Questa semplicità pur troppo non si verifica più allorchè si opera sopra nervi intatti e riuniti ai centri nervosi. È facile di scoprire sopra un coniglio o sopra un cane due lunghi tratti di nervi sciatici e di far passare per uno di questi nervi una corrente diretta e per l'altro l'inversa. Anche in questo caso è costante che la maggior contrazione della gamba si ha al chiudere del circuito colla corrente diretta e non manca quasi mai la stessa contrazione all' aprire del circuito nel membro percorso dalla corrente inversa. I fenomeni però non sono così distinti come sulla rana e come avvengono anche sul coniglio e sul cane, tagliati che sieno i nervi alla loro sortita dalla spina. Prima di questo taglio si ha la contrazione al chiudere anche colla corrente inversa e bisogna prolungare il passaggio di questa corrente per il nervo, perchè si vegga sparire questa specie di anomalìa e ricomparire la contrazione al cessare della corrente inversa.

Operando sopra cani o sopra conigli noi abbiamo il grande vantaggio di poter tener dietro anche alle sensazioni e al dolore che la corrente sveglia nell'animale. Il fenomeno più costante che in questi casi si rimarca e che Bellingeri e Marianini hanno anche verificato sopra le rane vive è che i segni di dolore si svegliano

quando cessa la corrente diretta e quando comincia l'inversa, cioè quando mancano le contrazioni. In questi due istanti si verificano anche delle contrazioni nel dorso dell'animale svegliate dalle *azioni* così dette *reflesse*, come infatti si prova tagliando loro la spina in diversi punti, per cui quelle contrazioni si limitano via via fra il nervo irritato dalla corrente e il punto in cui la spina è tagliata.

A questi fenomeni appartiene un'antica esperienza di Marianini che è stata in questi ultimi tempi lungamente studiata e variata da un distinto fisiologo francese il D. Chauveau di Lyon. Marianini montava una pila a colonna di Volta di 50 o 60 o 100 elementi. Chauveau usa degli apparecchi d'induzione, cioè delle correnti indotte. Marianini, dopo essersi bagnate le mani, chiudeva il circuito della pila colle due mani. È, come lo intendete facilmente, l'esperienza che già vedeste nella rana spaccata a metà e di cui un nervo è percorso dalla corrente diretta e l'altro dall'inversa. Anche nell'esperienza di Marianini vi è il braccio percorso dalla corrente diretta, che è quello che tocca il polo negativo, nel quale cioè le contrazioni sono eccitate dai filetti elettrici che percorrono la massa muscolare e dai filetti che percorrono i nervi nel senso della loro ramificazione. Vi sono perciò in questo braccio le condizioni perchè la scossa e le contrazioni siano maggiori che nell'altro braccio.

Nelle esperienze del D. Chauveau i due elettrodi sono applicati sopra due punti più o meno lontani di una stessa massa muscolare o di due muscoli diversi. Egli trovò che la maggior contrazione è sempre in prossimità del polo negativo. Come ben si vede questo risultato ha ana-

logia con quello di Marianini, e senza ricorrere ad immaginare altre ipotesi dobbiamo per ora fermarci a questa analogia.

Sopra questa proposizione si fonda l'uso della rana preparata, che chiamai, sono già molti anni, rana galvanoscopica, per scoprire non solo l'esistenza di variazioni piccolissime di stato elettrico, ma anche la direzione in cui le scariche o le correnti elettriche avvengono. La rana galvanoscopica consiste in una gamba di rana, alla quale è unito un lungo filamento nervoso, cioè il pezzo sciatico e, se si può, anche il pezzo lombare. Bisogna fare questa preparazione rapidamente perchè il nervo e il muscolo abbiano la maggior vitalità possibile. Quando si vuole usare questo istrumento, si posa la gamba sopra un piano di gutta-perca, o nell'interno di un tubo di vetro che si tien colla mano e si toccano due punti diversi del filamento nervoso con due punti qualunque del corpo in cui si suppone esistere il potere elettro-motore.

Se questo è, sia pur debolissima la corrente elettrica, vi sarà contrazione nella rana galvanoscopica in uno dei due istanti, cioè al chiudere o all'aprire del circuito. Tenendo dietro alla posizione del nervo e al momento della contrazione si giudicherà della direzione della corrente secondo che è diretta o inversa nel nervo.

Vedremo lungamente nelle lezioni prossime, perchè nell'usare la rana galvanoscopica conviene sostenerla sopra un piano isolante: la rana, come ogni muscolo, è un elettro-motore, e senza quella precauzione si ottengono le contrazioni e i segni della corrente per effetto dell'elettro-motore muscolare, e quindi per una causa che

risiede nell' istrumento. Quando si usa questa precauzione, la rana galvanoscopica diventa l'istrumento il più delicato che conosciamo, e vedremo nelle lezioni prossime sull'elettricità animale l'uso frequente che se ne fa. Intanto credo utile di mostrarvi colla rana galvanoscopica un'esperienza che vi darà un'idea della sensibilità di quest'istrumento, del modo di usarlo e che fa vedere un caso d'elettricità sviluppata interamente senza metalli. L'esperienza consiste in due lunghi tubi di vetro, pieni di quarzo o di vetro in polvere imbevuti d'acqua, uno dei quali pesca in una soluzione di potassa, e l'altro in un vaso di terra porosa immerso in questa soluzione e pieno d'acido nitrico. Col nervo della rana galvanoscopica tocco le estremità delle colonne di polvere di vetro o di quarzo che comunicano coi due liquidi della così detta pila di Becquerel. Allora vedo la rana contrarsi ora al chiudere, ora all'aprire del circuito secondo la posizione del nervo. La corrente va, come sappiamo, dalla potassa all'acido nel liquido, e circola nel nervo dal tubo di vetro immerso nell'acido al tubo di vetro immerso nella potassa. Quindi la rana si contrae quando comincio a toccare se la porzione libera del nervo tocca il tubo immerso nell'acido, e la porzione più prossima alla gamba tocca il tubo immerso nella potassa. Vi è dunque ragione per asserire che la rana galvanoscopica non è solamente nel maggior numero dei casi l'istrumento più delicato che abbiamo per scoprire la presenza dell'elettricità, ma che, convenientemente usata, può anche indicare la direzione della corrente.

Una seconda proposizione di elettro-fisiologia è, *che usando per eccitare un nervo, una corrente elettrica presa la meno intensa possibile e perciò tale che dimi-*

nuita ancora si scorgerebbe una diminuzione nella contrazione muscolare corrispondente, se si obbliga questa corrente a dividersi per metà fra due nervi, l'effetto eccitato nel muscolo è ridotto alla metà di quello che era nel primo istante quando la corrente passava intera nel nervo.

Questa proposizione sembra contraria a prima vista alla definizione generale che abbiamo dato degli effetti elettro-fisiologici: abbiamo insistito per far vedere che nascendo questi effetti solamente al principio e alla fine della corrente e non nel tempo in cui il circuito stava chiuso, essi erano in qualche modo indipendenti dalla quantità di elettricità.

Appoggiandosi sopra un fatto fisico, di cui la legge e la teoria ci sono note, vi dirò che anche lo sviluppo delle correnti indotte non ha luogo che quando l'azione comincia e quando cessa: lo che non toglie però che anche l'intensità delle correnti indotte, tutte le altre circostanze essendo eguali, non sia proporzionale alla intensità delle correnti inducenti.

Si dispone l'esperienza per dimostrare questa proposizione mettendo una rana preparata in uno dei dinamometri, usando una pila molto debole, e inserendo nel circuito una lunga colonna d'acqua pura.

In questo modo si usa la corrente ridotta al punto che una maggior diminuzione di essa si manifesta colla diminuzione dell'effetto fisiologico. Oltre di che poi, avendo già una grande resistenza introdotta nel circuito, quando la corrente si obbliga a passare per un secondo nervo, siccome la resistenza interna è già grandissima, si vede al galvanometro che la sua intensità

rimane sensibilmente la stessa. Si ha così la certezza che nel primo nervo passa allora la metà della corrente che passava nella prima esperienza, cioè quando quel nervo era solo. Allora si vede se l'esperienza è fatta bene, se si usa nel dinamometro un muscolo solo, se si opera nelle stesse condizioni, che lo sforzo muscolare è approssimativamente la metà di prima, cioè, che il peso attaccato al muscolo non è più sollevato che alla metà dell'altezza.

Dopo questa nuova proposizione potremo aggiungere che la rana galvanoscopica convenientemente adoperata non è solamente il galvanoscopio il più delicato che abbiamo, ma è anche un galvanometro.

La terza proposizione ben stabilita in elettrofisiologia è, *che la corrente elettrica non agisce o almeno è estremamente indebolita, allorchè agisce passando i nervi in traverso, anzi che scorrere i nervi nel senso della loro ramificazione.*

Nell'ignoranza in cui siamo sulla natura dell' agente nervoso e della sua dependenza dalla struttura del nervo, è impossibile di precisare il significato di questa relazione: ma ammetteremo *a priori* che il significato esiste e dev'essere importante.

Sarebbe troppo lungo riferire qui tutte le varie esperienze colle quali sin dai tempi di Galvani questa proposizione è stata successivamente affermata e contraddetta.

Dopo essermi lungamente occupato di questo soggetto vi mostrerò quella esperienza che mi sembra la più concludente. — Vedete sopra questo dado di legno fissate due lastre parallele, una di zinco e una di rame. Metto fra loro una striscia di carta bagnata come per formare una pila. E di fatti quando tocco le due lastre insieme

con un filo metallico, sono sicuro che la corrente circola in questo filo e che nello stesso tempo la striscia di carta è traversata da tanti filetti di corrente elettrica presso a poco tutti paralleli fra loro d'eguale intensità e diretti da una lastra all'altra. Vi è una maniera per rendervi evidente questa propagazione d'elettricità nello strato liquido. Essa consiste nel dividere lo strato liquido in due parti con un diafragma metallico, che è una lastra di platino, e nell'usare per liquido quel miscuglio di acetato di piombo e di rame col quale meglio riescono le famose apparenze elettro-chimiche del nostro Nobili. Facendo passare la corrente, se si usano degli elettrodi che abbiano la sezione stessa dello strato liquido, vedremo dopo pochi istanti la lamina interposta colorarsi egualmente in tutti i punti, e siccome questo colore viene da uno strato di materia deposta per un effetto elettro-chimico, e siccome il suo colore dipende per una proprietà ottica delicatissima dalla grossezza dello strato deposto, se la corrente non avesse la stessa intensità in tutti i punti, ce ne accorgeremmo presto per la differenza del colore. Questo non è: dunque i filetti di corrente che traversano il liquido da un elettrode all'altro hanno l'istessa intensità in tutti i punti e sono paralleli.

Torniamo alla prima esperienza.

Preparo la rana galvanoscopica e dispongo il suo lungo filamento nervoso sulla carta bagnata che è fra le due lastre della pila. Se il filamento è disposto in traverso, nel qual senso sono sicuro che non vi può essere filetto d'elettricità che percorra il nervo parallelamente al suo asse, non si vede mai contrazione nella rana quando fò agire la pila toccando le due lastre col filo metallico. E

notate che mentre opero così tutto un lungo filamento nervoso è disteso sulla carta e normalmente traversato dalla corrente in tutti i punti.

Inverto ora la posizione del nervo e lo distendo anche per un tratto molto più corto in modo che il filetto elettrico lo percorre parallelamente alla sua lunghezza. All'istante insorgono le contrazioni ora all'aprire, ora al chiudere del circuito, se la corrente è molto debole, o se il nervo ha già perduto un poco di eccitabilità.

È dunque fuori di dubbio che l'effetto della corrente sopra un nervo è nullo o per lo meno estremamente indebolito quando traversa il nervo normalmente alla sua lunghezza.

Non è senza qualche importanza il notare che, sia che s'immagini l'eccitazione del nervo colla corrente come dovuta a una specie di effetto meccanico che si propaga verso i muscoli o verso i centri nervosi, sia che si consideri quella eccitazione per l'analogia che pur deve avere colle azioni elettro-dinamiche in generale, si concepisce fino a un certo punto questa differenza di azione della corrente elettrica secondochè si propaga lungo l'asse o normalmente all'asse del nervo.

Quando si usa per fare queste esperienze o le scariche della bottiglia o le correnti indotte, quando si applicano i due elettrodi direttamente sul nervo, ora in traverso, ora lungo l'asse, s'intende facilmente come per questa disposizione sia difficile di ben realizzare le condizioni dell'esperienza e come avvenga che le correnti siano sempre molto intense, e che vi sia sempre una porzione dei filetti elettrici che percorre il nervo più o meno parallelamente all'asse. Nel modo che abbiamo operato, queste cagioni d'errore sono tolte e perciò questa proposizione si può ritenere come dimostrata dalla esperienza.

LEZIONE QUARTA.

(28 *aprile* 1861).

Per compiere la prima parte di questo corso, quella cioè dei fenomeni che la corrente sveglia nel suo passaggio attraverso ai nervi e ai muscoli di un animale vivo o recentemente ucciso, mi rimane a considerare particolarmente l' azione che la corrente spiega sulle proprietà del nervo, continuando a passare lungamente per esso: in questa occasione potrò darvi dei fenomeni elettro-fisiologici che si manifestano all'apertura del circuito una spiegazione, che, per essere fondata sopra leggi fisiche conosciute, costituisce uno dei progressi i più importanti fatti in questi ultimi tempi nell'elettro-fisiologia.

Riprendiamo la solita preparazione della rana, cioè la rana alla Galvani spaccata a metà e percorsa dalla corrente elettrica da un membro all' altro. Con questa disposizione noi siamo sicuri, come già vi dissi nella Lezione precedente, di avere due nervi presi sullo stesso animale e nello stesso tempo percorsi l'uno dalla corrente diretta e l'altro dall'inversa, e con cui possiamo sicuramente paragonare lo stato loro. L' esperienza può essere disposta, sia mettendo la rana a cavallo fra due

bicchierini pieni d'acqua comune e in cui pescano i due elettrodi di una pila, sia posando direttamente questi elettrodi sopra i due nervi.

Si sa in fisica, che allorquando la corrente traversa un liquido per mezzo di due elettrodi di platino, i prodotti dell'elettrolizzazione, cioè l'ossigene e gli acidi che vanno al polo positivo, l'idrogene e gli ossidi che vanno al polo negativo, si fissano così tenacemente sui metalli degli elettrodi da dar luogo, chiudendo poi il circuito fra essi soli, a una corrente che chiamiamo *secondaria*, e che è diretta in senso contrario alla corrente della pila, perchè, come si sa in elettro-chimica, la corrente svolta fra idrogene e ossigene, fra ossido e acido, va nel liquido dal primo al secondo. E infatti questa corrente si otterrebbe nello stesso modo, se quelle lastre di platino, che fanno da elettrodi, fossero state per un certo tempo immerse, l'una nel gas idrogene o nella potassa, l'altra nel gas ossigene o nell'acido.

Quando si fa passare la corrente per mezzo di elettrodi di platino posati sui nervi della rana preparata, allora pure si producono le polarità secondarie e quindi si ha all'apertura del circuito della pila e chiudendo il circuito dei soli elettrodi la corrente secondaria che è capace di eccitare la contrazione muscolare: volendo, in alcune esperienze molto delicate, evitare queste polarità secondarie, si usano per elettrodi invece di fili di platino, fili di zinco amalgamato e fra essi e i nervi s'interpone una carta bagnata di una soluzione satura di solfato di zinco. In queste condizioni, come lo diremo in seguito, mancano interamente o quasi interamente le polarità secondarie, e si ha così un me-

todo, di cui vedremo in breve la grande utilità, onde non avere nei circuiti in cui entrano gli elettro-motori animali, come sono i muscoli o gli organi dei pesci elettrici, la corrente secondaria, che per essere opposta a quella di questi elettro-motori non tarda a diminuirla ed anche a distruggerla interamente.

Torniamo all' esperienza con cui voglio mostrarvi in una maniera evidente l' azione che ha la corrente continua sull'eccitabilità dei nervi, secondo la direzione in cui li percorre. Perchè non vi sia alcuna incertezza nei risultati, e perchè abbiate dinanzi diverse prove della stessa verità, ho disposte quattro esperienze simili, cioè quattro rane egualmente preparate e tutte traversate da un'estremità all'altra dalla corrente elettrica.

Se l' esperienza è disposta da poco tempo, sappiamo già cosa avviene: quando apro il circuito si contrae il solo membro percorso dalla corrente inversa, e quando poi torno a far passare la corrente si contrae il membro percorso dalla corrente diretta.

Questa prima esperienza non fallisce mai, e solo avviene usando la rana di recente preparata e molto vivace, oppure una corrente molto forte, che da principio si contraggono i due membri, tanto all' aprire che al chiudere del circuito; ma dopo pochi momenti compare il fenomeno che chiameremo normale, cioè la contrazione nel membro, che per brevità chiameremo diretto, nel chiudere del circuito, e la contrazione nel membro inverso quando il circuito si apre.

Prima di procedere più oltre voglio mostrarvi un'osservazione importante di Marianini, che cioè la contrazione corrispondente all'apertura del circuito si manifesta

anche quando non vi è stata la contrazione al chiudere. A questo fine invece di far passare la corrente immergendo gli elettrodi della pila nell'acqua posso chiudere il circuito con un conduttore umido, non però perfettamente imbevuto d'acqua, come sarebbero le dita nostre o un pezzo di flanella o di cotone immerso nell'acqua di uno dei bicchieri.

In questo modo l'acqua penetrando adagio adagio nello stoppino o nella mano, anche la corrente entra e cresce a gradi a gradi nel circuito e per ciò manca la contrazione: non è più così quando il circuito s'interrompe; cessa allora bruscamente il passaggio della corrente e si ottiene la contrazione.

Voglio anche farvi notare un modo di produrre le contrazioni coll'apertura del circuito, che per quanto semplice può dar luogo per menti non abituate a ragionare sopra queste esperienze a interpetrazioni erronee. Eccovi la rana al solito preparata e traversata da qualche tempo dalla corrente. Tocco con un pennellino bagnato d'acqua o di un altro liquido qualunque il nervo percorso dalla corrente diretta e nulla ottengo. Tocco l'altro nervo col pennellino bagnato e all'istante si svegliano in questo membro le contrazioni le più violenti. Per chi vede per la prima volta quest'esperienza difficilmente vien fatto di cadere sulla cagione, benchè molto semplice, del fenomeno e pur troppo potrebbe essere tentato anzi ad immaginare un' azione specifica di quei liquidi sui due nervi.

Con un poco di riflessione s'intende presto che quando il nervo percorso dalla corrente inversa è bagnato da una goccia d'acqua, questa goccia che inviluppa il nervo fa per il nervo l'effetto di aprire il circuito; la corrente

lascia il nervo per prendere il liquido che conduce molto meglio e così si ha la contrazione dell'apertura del circuito nel membro percorso dalla corrente inversa.

Premesse queste considerazioni è tempo che vediamo cosa avviene delle rane preparate e sottoposte da 15 o 20 minuti o più al passaggio di una corrente. Al momento in cui apro il circuito il solo membro percorso dalla corrente inversa entra in contrazione, si solleva e il più delle volte rimane tetanico per diversi secondi. Richiudendo poscia il circuito, non si ha contrazione nè nel membro inverso nè nel membro percorso dalla corrente diretta, o se si ha in quest'ultimo è piccola e cessa dopo aver ripetuta due o tre volte la stessa esperienza.

Richiudendo il circuito immediatamente dopo averlo aperto, cioè nel tempo in cui il membro percorso dalla corrente inversa è tetanico, si vedrà questo membro rilasciarsi e cessare la contrazione.

Questa esperienza si verifica egualmente se la corrente si fa passare direttamente da nervo a nervo senza traversare i muscoli. Si nota solamente che in questo caso la corrente produce l'effetto descritto in un tempo minore che allorquando traversa l'intero animale.

Lo stesso avviene anche operando sopra la rana viva o sopra animali superiori: solamente l'effetto è più lento a prodursi e non si giunge mai e difficilmente sull'animale vivo ad ottenere quella contrazione tetanica prolungata che mostra il membro della rana preparata e percorsa dalla corrente inversa allorchè si apre il circuito.

Questi risultati conducono alla proposizione seguente:

Una corrente continua trasmessa in un nervo misto modifica l'eccitabilità del nervo in un modo diverso, ed anzi si può dire opposto, secondo la sua direzione; la corrente diretta indebolisce e distrugge l'eccitabilità del nervo, mentre l'inversa l'accresce dentro certi limiti. Il tempo necessario perchè la corrente produca questi effetti è proporzionale al grado d'eccitabilità del nervo ed è in ragione inversa dell'intensità della corrente. Dopo l'apertura del circuito gli effetti della corrente tendono a dileguarsi e ciò tanto più rapidamente quanto più è grande l'eccitabilità del nervo e quanto più debole fu la corrente adoperata.

Importa che vi mostri indipendentemente dall'uso della corrente elettrica che i due nervi che sono stati percorsi dalla corrente elettrica hanno acquistata quella differenza d'eccitabilità, cioè, che nel nervo percorso dalla corrente diretta l'eccitabilità è molto diminuita o estinta ed è invece conservata od accresciuta nel nervo percorso dalla corrente inversa. Perciò prendo una qualunque delle rane preparate che sono state assoggettate al passaggio della corrente e tocco or l'uno or l'altro dei suoi nervi, sia con un pezzo di potassa, sia con un ferretto rovente, oppure taglio questi nervi colle forbici. Qualunque di questi modi si adoperi per eccitare il nervo, vedrete la contrazione svegliarsi se opero sul nervo che fu percorso dalla corrente inversa, mentre nulla accade agendo egualmente sul nervo percorso dalla corrente diretta.

Questa proposizione mette in chiaro e spiega nel tempo stesso il fenomeno scoperto dal Volta che ancora si chiama in elettro-fisiologia il fenomeno delle *alternative voltiane*.

Il Volta osservò pel primo che facendo passare per lungo tempo una corrente elettrica in una rana preparata sinchè la contrazione fosse cessata, si otteneva di nuovo questo fenomeno quando si faceva passare la corrente in direzione contraria.

L'analisi rigorosa di questo fenomeno è la seguente. Eccovi la solita rana spaccata a metà e percorsa già da un certo tempo dalla corrente; essa è ridotta a quel punto in cui non vi è più che la sola contrazione nel membro percorso dalla corrente inversa all' apertura del circuito. Rovescio la posizione degli elettrodi, oppure rovescio la rana ed ho cura di tingere con una goccia di inchiostro il membro che era percorso dalla corrente diretta e che non si contraeva più. Lasciata di nuovo passare la corrente per un certo tempo, il membro che non si contraeva più e che ora è percorso dalla corrente inversa torna di nuovo a contrarsi, come pure al chiudere del circuito avete visto contrarsi l'altro membro per l'azione della corrente diretta, lo che prima non accadeva, e ciò per l'eccitabilità mantenuta nel suo nervo dalla corrente inversa. In una parola, le alternative voltiane provengono dalla diversa azione che ha la corrente sui nervi secondo la sua direzione: nel nervo inverso l'eccitabilità è conservata ed accresciuta, per cui quando comincia a passare la corrente diretta, si sveglia la contrazione, ciò che non farebbe sul nervo che non avesse subito l'effetto della corrente inversa o che avesse subìto la corrente diretta; nel nervo diretto il passaggio successivo della corrente inversa restituisce l'eccitabilità e si torna così ad avere la contrazione all'apertura del circuito.

È col dinamometro che questa importante proposizione

è stata rigorosamente dimostrata. Si possono facilmente avere le due metà della stessa rana fissate col pezzo di spina nella pinzetta del dinamometro; indi s' inserisce il gancio inferiore ora nell' una ora nell' altra gamba, e si fa passare successivamente la stessa corrente diretta in uno dei nervi e inversa nell' altro. Misurando poi i sollevamenti ottenuti nelle diverse esperienze si riesce a determinare con misure esatte questa proposizione. È così che si vede, facendo passare la corrente diretta per certi intervalli di tempo e via via aprendo e chiudendo immediatamente dopo il circuito, che la contrazione dovuta a questa corrente decresce rapidissimamente; si può ancora riottenere più forte, almeno dentro certi limiti o abbreviando il passaggio della corrente o ripetendo la sua azione dopo avere lasciato il circuito aperto per un tempo più lungo onde si dilegui l' effetto della corrente stessa. Ben diversamente si conduce la corrente inversa. Si vede con questa corrente sull' altra mezza rana la contrazione rimanere costante ripetendo più volte il passaggio della corrente. Si può anche vedere distintamente l' effetto della corrente inversa facendola passare prima per una frazione di secondo, e poi per tre o quattro o cinque secondi. In questo modo si ottiene una contrazione all' aprire del circuito che cresce dentro questi limiti proporzionalmente al tempo del passaggio della corrente.

Questa esperienza è anche più concludente quando si fa agire la corrente inversa sopra un nervo di cui l'eccitabilità è stata indebolita dal passaggio della corrente diretta: per ottenere il massimo di contrazione bisogna allora che il passaggio della corrente inversa si prolun-

ghi per un tempo che può durare dai 25 ai 30 secondi.

Allorchè si opera sull' animale vivo o recentissimamente ucciso, basta di lasciare la rana a sè, cioè fuori del circuito, perchè si dileguino gli effetti del passaggio continuo della corrente diretta o inversa. Si osserva allora che la rana, in cui il nervo ha perduto l'eccitabilità colla corrente diretta, col riposo torna capace a contrarsi con quella stessa corrente.

Non posso lasciare questo soggetto senza chiamare di nuovo la vostra attenzione sopra il fatto che vi ho già mostrato della contrazione tetanica e prolungata da cui è assalito il membro percorso dalla corrente inversa dopo il passaggio di 30 o 40 minuti. Questo fatto ci ha messo in questi ultimi tempi in grado di fondare la spiegazione dei fenomeni elettro-fisiologici che nascono all' apertura del circuito sopra una teoria fisica conosciuta, ciò che costituisce il progresso il più grande che l' elettro-fisiologia abbia fatto recentemente.

Eccovi la solita rana spaccata a metà e che fu assoggettata al passaggio della corrente. Apro il circuito e all' istante il membro percorso dalla corrente inversa è assalito dalla contrazione tetanica. Voglio mostrarvi subito un' esperienza molto netta, la quale vi proverà che questa contrazione dipende da uno stato particolare in cui il passaggio della corrente inversa ha messo il nervo lombare. Infatti, se interrompo il circuito tagliando questo nervo al punto della sua sortita dalla spina, si ha la contrazione tetanica come al solito, mentre questa manca interamente se si taglia il nervo precisamente al suo ingresso nei muscoli.

Ma che cosa è questo stato particolare del nervo? È

a questa domanda che risponde una scoperta fisica recente.

Sappiamo cosa sono le polarità secondarie e vi ho già detto che esse si sviluppano sui filamenti nervosi come sopra un conduttore umido qualunque, come sarebbe una striscia di carta o di flanella imbevuta da una soluzione salina.

Vediamo ora l'esperienza principale.

Prendo il nervo sciatico di un pollo, lo poso sopra un manico di gutta-perca, lo porto al galvanometro, e dopo essermi assicurato che toccando colle estremità del galvanometro due punti delle superficie di questo grosso nervo, non vi è alcun segno di corrente, poso il nervo sopra i due elettrodi di platino o di carta umida di una pila di otto o dieci elementi di Grove. Fo passare la corrente pel nervo per diversi minuti e poi torno col nervo al galvanometro. Ottengo allora una fortissima corrente in senso opposto a quello della pila, e che è, secondo tutte le analogie, una corrente dovuta alle polarità secondarie. Infatti questa corrente si ha sopra un nervo morto da molte ore ed anche da diversi giorni, come sul nervo preso sull'animale vivo, si ha sopra un cordone bagnato, sopra il fusto di una pianta verde, sopra un corpo solido qualunque che è imbevuto da un liquido.

Il passaggio della corrente raccoglie l'idrogene e le basi nei punti toccati dal polo negativo, l'ossigene e gli acidi nei punti toccati dal polo positivo. Questi prodotti dell'elettrolizzazione si diffondono via via per il corpo solido umido, e lo trasformano per tutta la sua lunghezza in un elettro-motore secondario.

Infatti vi posso mostrare sopra un pollo che è stato

preparato precisamente come la rana, cioè ridotto al bacino e a un pezzo di spina, ai due grossi nervi lombari e alle gambe e che fu traversato dalla corrente da una gamba all'altra, vi posso mostrare che i due nervi hanno acquistato il potere elettro-motore secondario senza che siano stati toccati direttamente dagli elettrodi della pila.

Dopo avere scoperto la proprietà elettro-motrice secondaria nei nervi, mi sono anche assicurato che essa non ha la stessa intensità in tutti i punti, e che il pezzo di nervo posto presso il polo positivo e in cui entra la corrente, ha acquistata questa proprietà in un grado molto più forte che il pezzo posto presso il polo negativo. Anche questa esperienza vi può essere facilmente mostrata. Prendo il nervo dopo che fu assoggettato al passaggio della corrente, lo taglio a metà e rivolto la posizione di una di queste metà, riproducendo il pezzo di nervo come prima. Siccome sappiamo che il nervo è divenuto, per il passaggio della corrente in tutti i suoi punti, un elettro-motore, l'operazione che ho fatto sarebbe quella stessa se avessi 10 pile di Volta, tutte in serie, e che poi aprissi la pila a mezzo per rivoltare cinque di queste pile e ristabilire la comunicazione col rimettere i due zinchi o i due rami assieme. Si hanno così due mezze pile opposte, per cui se le coppie hanno tutte la stessa forza elettro-motrice, le due pile si elidono. Se però una delle pile è più forte, si ottiene subito la corrente differenziale, cioè una corrente dovuta all'eccesso della pila la più forte.

Se dunque anche quelle due parti del nervo che la corrente ha convertito in un elettro-motore secondario,

non hanno la stessa forza, me ne accorgerò subito dopo averlo tagliato a metà e messa una di queste metà in opposizione all'altra. E in realtà quando poso il nervo così preparato al galvanometro, trovo una forte corrente differenziale che è nel senso del pezzo del nervo che era prossimo al polo positivo.

Dunque è una conseguenza semplice e dedotta da una teoria fisica conosciuta, cioè quella delle polarità secondarie, che un nervo diventa un elettro-motore per il passaggio della corrente, e che quindi è in grado di dare una corrente secondaria cessata che sia la corrente della pila. In una parola, un nervo dopo esser stato traversato da una corrente Voltiana, è traversato dalla corrente secondaria che è in senso opposto a quella della pila e che può circolare in quelle parti del nervo in cui la polarizzazione secondaria non si sviluppa, e che certamente si neutralizza e produce una scarica per la differenza grande del potere elettro-motore secondario nei diversi punti del nervo stesso. Ecco così con tutta la probabilità spiegato che cosa è quello stato che dicemmo sconosciuto, in cui è posto il nervo percorso dalla corrente inversa e che sveglia la contrazione tetanica nei muscoli della rana. Questo nervo non è nient'altro che quella porzione prossima al polo positivo, che è percorsa dalla corrente e che abbiamo mostrato acquistare il potere elettro-motore secondario il più forte: è dunque quel pezzo di nervo che dopo l'apertura del circuito è traversato dalla scarica o dalla corrente secondaria la più forte e la più prolungata possibile: e siccome la corrente secondaria è sempre in senso contrario alla corrente della pila che l'ha eccitata, ne viene che nel nervo

inverso la corrente secondaria è diretta, cioè in quel senso che fino dalla prima proposizione vi mostrai avere l'azione elettro-fisiologica la più forte. Oltre di ciò l'effetto di questa corrente secondaria deve essere anche accresciuto, perchè sappiamo che la corrente inversa mantiene l'eccitabilità del nervo, lo che forse avviene, perchè appunto la corrente inversa non eccita la contrazione e non consuma, per dir così, il muscolo, come fa la diretta.

In conclusione, le contrazioni svegliate in un muscolo di cui il nervo fu percorso dalla corrente inversa continua, si devono con tutta la probabilità all'effetto fisiologico della corrente secondaria, che è diretta. E che questa corrente o scarica secondaria diretta esista, si prova col galvanometro, come già vi feci vedere, e si prova anche colla rana galvanoscopica. Infatti, se applico il nervo di questa rana sul nervo del pollo che fu percorso dalla corrente inversa, subito dopo aperto il circuito vedo la rana galvanoscopica contrarsi e ciò principalmente se metto il suo nervo presso i punti prossimi al polo positivo e nella direzione conveniente.

Voglio citarvi anche una osservazione importante fatta recentemente da Pfluger e che potrà forse un giorno rientrare fra i fenomeni elettro-fisiologici dipendenti dal potere elettro-motore secondario dei nervi. Pfluger ha trovato che mentre un nervo è percorso da una corrente continua *l'eccitabilità è aumentata al di là della regione o dei punti toccati dall'elettrode negativo, e ciò tanto più quanto più il punto che si considera è prossimo all'elettrode. Il contrario avviene al di là dell'elettrode positivo, dove invece l'eccitabilità è diminuita.* Per fare questa

esperienza Pfluger fa passare una corrente continua nel nervo sciatico di una rana galvanoscopica e poi sottopone questo nervo nei punti non percorsi dalla corrente all'azione di diversi corpi stimolanti, come sarebbe l'acqua più o meno salata e di cui fu determinata precedentemente l'azione. Allora si trova, secondo quel fisiologo, che lo stimolo, che applicato ad un certo punto del nervo non sveglia la contrazione, è capace di produrre questo effetto allorchè il nervo è traversato dalla corrente se quel punto è vicino all'elettrode negativo. Invece uno stimolo capace di svegliare la contrazione, non la sveglia più quando il nervo è percorso dalla corrente se è applicato verso l'elettrode positivo.

Questi fatti curiosi sono stati attribuiti dai fisiologi di Germania ad uno stato particolare del nervo di cui ci occuperemo più tardi e che chiamarono *elettro-tonico*. Prima di abbandonarsi a delle ipotesi, sarebbe stato più conveniente di cercare quale influenza possono avere i prodotti dell'elettrolizzazione raccolti sul nervo in contatto degli elettrodi, sulla composizione e quindi sulle proprietà fisiologiche delle sostanze stimolanti usate da Pfluger.

Oltre di che noi abbiamo trovato che gli effetti del potere elettro-motore secondario del nervo si estendono anche al difuori dei punti toccati dagli elettrodi. Così fra la porzione del nervo fuori dell' elettrode positivo e i punti toccati da questo elettrode, vi è una corrente secondaria diretta nel nervo nel senso della corrente della pila. Anche al di là dell'elettrode negativo vi è una corrente secondaria e che fu riscontrata molto più forte di quella prodotta al di là dell'elettrode positivo, e che è pure diretta come la corrente della pila.

Non vi è nessuna difficoltà a concepire l'origine di queste correnti e la loro direzione, ricordandosi che esse dipendono dalle correnti svegliate fra le porzioni che chiameremo neutre del nervo e i punti che per essere stati in contatto o prossimi agli elettrodi sono bagnati l'uno di un liquido acido, l'altro di un liquido alcalino. Anche questi poteri elettro-motori secondari al di fuori dei poli possono intervenire negli effetti trovati da Pfluger.

Dopo avervi esposto, forse troppo diffusamente, l'applicazione del poter elettro-motore secondario dei nervi ai fenomeni elettro-fisiologici che si svegliano all' apertura del circuito, mi proverò di dirvi brevissimamente quelle poche ed imperfette cognizioni che abbiamo sull' azione della corrente nei muscoli soli, nelle parti centrali del sistema nervoso e sui nervi del sistema ganglionare.

Quando si fa passare una corrente o una scarica attraverso ad un muscolo si sveglia la contrazione e ciò avviene, come è naturale, indipendentemente dalla direzione della corrente. Questa contrazione è qualche volta persistente; così quando si fa passare la scarica di una bottiglia attraverso al gastrocnemio staccato da una rana viva, si vede questo muscolo accorciarsi anche di un quarto e più della sua lunghezza e rimanere accorciato. Si direbbe che le parti di un muscolo, allorquando è spenta o quasi spenta l'azione nervosa, tendono ad avvicinarsi fra loro, e che una volta avvicinate vi rimangono, come avviene dopo la morte nel caso del rigor cadaverico.

Vi ho già detto che Chauveau ha in questi ultimi tempi variate le esperienze fatte sui muscoli applicando la corrente indotta sopra le masse muscolari, ed ha trovato che la contrazione maggiore e più persistente avviene

sempre in contatto dell'elettrode negativo. Per quanto si può, abbiamo interpretato questo fenomeno, attribuendolo all' azione della corrente *diretta* sui nervi di quelle masse muscolari.

Ricorderò ancora che le contrazioni svegliate dalla corrente nei muscoli di una rana uccisa col curaro e di cui i nervi hanno perduta ogni traccia di eccitabilità, provano che la sola fibra muscolare indipendentemente dai nervi si contrae sotto l' elettricità come sotto gli altri stimoli.

Molti anni sono, Longet ed io studiammo l'azione della corrente elettrica sopra le radici spinali, cioè su quei nervi semplici che per la grande scoperta di Carlo Bell godono isolatamente, o della proprietà di svegliare le contrazioni, o di quella di eccitare il dolore allorquando sono irritati.

Da una lunga serie di esperienze, che furono in seguito verificate in Germania ed altrove, fummo condotti Longet ed io a dei risultati che erano sopra tutto notevoli per essere opposti a quelli che si ottengono sui nervi misti e che abbiamo definito nella prima proposizione. Così, agendo colla corrente diretta sulle radici anteriori, non si ottiene la contrazione al chiudere, ma all'aprire del circuito; colla corrente inversa la contrazione ha luogo al chiudere e nulla all' aprire. Sono contento di potervi dire che questa anomalia è oggi scomparsa per una considerazione ingegnosa fatta da due fisiologi francesi, Roufseau e Martin-Magron, di cui vi ho già dato un cenno. Nelle esperienze fatte da me e da Longet, la radice spinale non era distaccata dalla spina, ma semplicemente sollevata ad ansa con un filo

di seta o con un piano isolante sottoposto. Per questo modo di operare, come già avete visto, la maggior porzione della corrente non passa nel nervo diretta da un elettrode all'altro nell'intervallo più corto, ma scorre al di fuori dei poli scaricandosi nel conduttore circoscante: quindi è che nella porzione del nervo più prossima al muscolo la corrente *derivata* ha una direzione opposta a quella della porzione di corrente che va da polo a polo nell'intervallo più corto. Riprendo l' esperienza che già vi ho mostrato del cordone bagnato piegato ad ∩ e che posa sopra uno strato buon conduttore. Se fo passare la corrente nella porzione superiore del cordone, vedremo contrarsi la rana galvanoscopica, di cui il nervo è disteso sul cordone o sul piano conduttore al di fuori dei poli; questa contrazione è certamente l'effetto della così detta corrente derivata. Perciò, per interpretare gli effetti della corrente sulle radici spinali, bisogna decidere quale è di queste due porzioni di corrente quella di cui l' azione fisiologica prevale. Comincio dal dirvi che se invece di operare sulle radici spinali riunite alla midolla e sollevate ad ansa con un filo di seta, si tagliano queste radici alla sortita dalla spina, e se ne tiene sollevato il capo libero, allora si trova che la corrente elettrica agisce come sopra i nervi misti.

In questa disposizione la corrente derivata al di là dei poli non può più esistere; era dunque questa corrente che interveniva nelle anomalie osservate da Longet e da me. E per verità è facile di provare sopra un nervo misto qualunque, che, a misura che la sua eccitabilità si estingue, essa si va ritirando verso i muscoli se si agisce colla corrente per svegliare le contrazioni e che invece si ritira verso i centri nervosi per gli effetti di sensazione.

Non è dunque meraviglia se nelle nostre esperienze sulle radici spinali era la corrente derivata agente nel tratto del nervo più vicino al muscolo di cui l'azione era prevalente. Di questo si dà anche una prova sperimentale. Prendo, per formare uno degli elettrodi, una forcella a due branche ed applico questa forcella sopra il nervo di una rana galvanoscopica, e poso l'altro elettrode in mezzo alle due punte della forcella. S'intende subito che se l'elettrode di mezzo è per esempio il positivo, la corrente si divide in due rami, cioè uno discendente e l'altro ascendente; benchè queste due porzioni di corrente siano eguali, si vedrà che gli effetti prevalenti sono quelli che sono dovuti alla parte discendente, che è la più prossima al muscolo.

Ricevono la stessa spiegazione le esperienze ultimamente fatte dal D. Radcliffe, facendo passare la corrente sopra uno dei nervi lombari di una rana preparata alla Galvani. Se quel nervo è sollevato ad ansa e se la corrente si fa passare nel tratto sollevato, vi sono delle contrazioni svegliate nel membro di cui il nervo non è traversato dalla corrente e che dipendono appunto dalla porzione di corrente che circola al di là dei poli e che invade anche l'altro nervo lombare.

È stato tentato lo studio dell'azione della corrente sulle diverse parti del cervello di un animale vivo o recentemente ucciso, e fu trovato semplicemente che la corrente vi agiva come gli stimoli meccanici applicati a quelle parti.

Agendo coll'elettricità o sull'orecchio o sull'occhio, gli effetti che si svegliano sono le sensazioni corrispondentie dovute all'eccitazione dei nervi di questi organi.

Quanto all'orecchio si assicura che il passaggio della

corrente sveglia un suono continuo: nell'occhio invece si produce una sensazione luminosa al principio e alla fine del passaggio della corrente, come se l'effetto dipendesse da una azione meccanica provata dall'occhio e dovuta alle contrazioni dei muscoli dell'occhio stesso. Questi studi meriterebbero maggiori sviluppamenti.

Vi dirò una parola finalmente dell'azione della corrente sui nervi ganglionari. Humboldt pel primo studiò l'azione della corrente sul plesso cardiaco e sul sistema ganglionare del basso ventre. Nel primo caso osservò Humboldt e fu in seguito verificato da altri, che, tenendo chiuso il circuito per un certo tempo, le pulsazioni del cuore non mostrano differenza, ma che poi continuando l'eccitazione elettrica queste pulsazioni divengono più frequenti, e che questa frequenza dura per un certo tempo dopo che la corrente ha cessato di passare.

Quando si opera colla corrente sul sistema ganglionare del basso ventre si nota un fatto analogo. Il così detto moto vermicolare degli intestini a poco a poco si fa più celere e dura con questo aumento anche per un po' di tempo dopo l'apertura del circuito. In questi due effetti l'eccitazione elettrica del sistema nervoso gaglionare sarebbe diversa da quella dei nervi misti per essere nel primo caso l'eccitazione continua durante il passaggio della corrente, più lenta a manifestarsi e più lenta a cessare.

Questo soggetto, tanto per le applicazioni terapeutiche, quanto per la fisiologia, dovrebbe essere ripreso e ben condotto con nuovi studi che potrebbero essere tentati anche sull'uomo e che consisterebbero nel determinare con esattezza le quantità d'urea dell'urina, la quantità

d'acido carbonico esalato e la varia composizione della bile e dei prodotti della digestione, secondo che l'animale o l'uomo su cui si sperimenta, tutte le altre circostanze restando uguali, hanno subìto più o meno lungamente l'azione della corrente, ora interrotta, ora continua a traverso ai visceri del basso ventre.

Sarebbe anche tanto più importante questo studio oggi che si sa che il sistema ganglionare agisce sui vasi sanguigni, ora per stringerli, ora per dilatarli. È così che avviene nelle belle esperienze di Budge e di Bernard. Dopo avere tagliato sopra un animale vivo un certo filetto nervoso, che, se non erro, riceve almeno in parte la sua azione dal sistema ganglionare e per il qual taglio l' orecchio della parte corrispondente diviene molto più caldo dell' altro e s' ingorga di sangue, fu trovato che eccitando colla corrente la porzione periferica del filetto stesso, il sangue tornava a circolare e scompariva l' innalzamento di temperatura che non era che un effetto secondario. È probabile che nelle funzioni di secrezione e negli atti fisico-chimici della nutrizione avvengano effetti analoghi.

Non posso finire questa lezione che completa lo studio dei fenomeni fisiologici svegliati dall'elettricità, cioè la prima parte di questo Corso, senza un cenno degli usi terapeutici dell' elelettricità. Nei primi tempi, dopo la scoperta della bottiglia di Leyda, e più tardi, dopo la pila di Volta, gli effetti singolari e nuovi della elettricità avevano talmente esaltata l' immaginazione dei medici che si credeva di avere trovato l' agente misterioso della vita, il rimedio universale.

Naturalmente tutta questa fantasmagoria si dileguò

presto e non è rimasto e non resterà mai nella scienza altro che il frutto di osservazioni ben fatte e ripetute e specialmente fondate sopra gli studi elettro-fisiologici.

Per aver vista l' albumina coagularsi intorno all'elettrode positivo e ciò per l' acido che si sviluppa per la elettrolizzazione e che coagula l'albumina come un acido libero qualunque, si era creduto che la corrente elettrica potesse dissipare la cateratta, allorquando intorno al cristallino che non è più trasparente si chiamasse coll' elettrode negativo un alcali. Facendo l' esperienza della elettrolizzazione dell' albumina, si vede il coagulo formarsi intorno ai due elettrodi, benchè maggiore intorno al positivo che al negativo, come dev'essere; ma quello che non si vede e che non accade mai è che invertendo la corrente, l' albumina coagulata intorno all'elettrode positivo si disciolga, perchè questo elettrode è divenuto negativo. Quindi è che non solo colla corrente elettrica non si può guarire una cateratta, ma invece si può quasi sicuramente crearla.

Fu anche proposto l' uso della corrente elettrica per disciogliere i calcoli nella vescica. Per giudicare di questo metodo basterà di ricordare che i calcoli sono formati di materie insolubili nelle urine e che una corrente non può scomporre un composto insolubile. Perchè la cosa fosse possibile bisognerebbe riempire la vescica in cui è il calcolo di una soluzione alcalina concentrata, attraverso alla quale si farebbe passare una corrente elettrica molto intensa.

Si citano alcuni casi di guarigione di sacchi aneurismatici ottenuta col metodo di Petrequin. Questo Chirurgo fa traversare il sacco aneurismatico da aghi

d'acciaio che porta molto prossimi e quasi in contatto fra loro e fa passare per essi una forte corrente elettrica. Sia per riscaldamento, sia per calore, si formano delle masse coagulate nel sacco; un processo inflammatorio si sveglia nelle sue pareti, e così si può intendere fino a un certo punto come si riesca a portare la guarigione per mezzo dell'elettricità nei casi di aneurismi incipienti e limitati.

Anche l'uso di un filo di platino finissimo reso incandescente colla corrente elettrica, è stato proposto in chirurgia come cauterizzante e per tagliare prontamente dei polipi in parti nascoste.

Ruhmkorff propone l'uso della luce elettrica per rendere visibile lo stato morboso di alcune parti profonde del corpo.

Il Professore Burci facendo passare una forte corrente elettrica a traverso ad un feto extra-uterino distruggeva la vitalità di questo feto, il quale poi a poco a poco si dileguava.

Le applicazioni più serie e meglio dimostrate dell'elettricità sono state fatte e si fanno tuttavia alla cura del tetano e delle paralisi. Si fondano queste cure sopra i fatti elettro-fisiologici che già conosciamo. La corrente elettrica diretta e continua distrugge l'eccitabilità del nervo, cioè mette il nervo in uno stato che si può considerare analogo a quello di un nervo paralizzato. La corrente inversa invece cresce quella eccitabilità e dentro certi limiti la restituisce quando è perduta. È questo il fatto delle alternative Voltiane che vi ho mostrato. Ricordiamoci ancora che nell'aprire del circuito abbiamo visto il membro che era stato percorso dalla

corrente inversa per un certo tempo assalito da una forte contrazione tetanica che durò molti secondi: per far cessare questa contrazione basta di ristabilire il passaggio continuo della corrente.

Abbiamo anche visto facendo passare nei nervi di un animale vivo una corrente interrotta per mezzo di una ruota d'interruzione o con un apparecchio d'induzione elettro-magnetico che ha l'interruttore di De-la-Rive nel circuito della pila, che quell'animale è preso da violenti convulsioni tetaniche, le quali non tardano ad ucciderlo. Naturalmente queste forti e continuate contrazioni consumano una gran dose di potenza nervea in un tempo così breve, che non può essere riparata dall'organismo: forse è questo il modo misterioso di agire di certi veleni che operano sul sistema nervoso con tanta energia.

Aggiungerò per ultimo una osservazione che facilmente s'intende, ma che pure può aiutarci e spiegare il modo di agire dell' elettricità nelle paralisi. Supponiamo di tagliare i nervi motori delle due membra inferiori di una rana viva, e di aver cura di irritare ogni giorno, per un certo tempo, uno solo di questi nervi. Se dopo questo tempo proveremo coi soliti stimoli il grado d'irritabilità muscolare dei muscoli delle due membra, troveremo indubitatamente che questa irritabilità è assai maggiore per i muscoli fatti contrarre ogni giorno, che per gli altri lasciati sempre in riposo.

Ecco i fatti e i principii sui quali scientificamente si fonda l'uso dell'elettricità alla cura del tetano e sopra tutto della paralisi. Volendo vincere le contrazioni tetaniche, secondo i principii esposti, bisogna sottoporre il malato a una corrente continua. Non conosco che un caso

solo d'un tentativo di questo genere. Durante il passaggio della corrente le sofferenze dell'infermo s'alleviavano; ma disgraziatamente, forse perchè il tetano era l'effetto di una infiammazione svegliata dalla presenza di corpi estranei, questo miglioramento non fu che passeggero. Quando anche la cura elettrica non avesse altro oggetto che di alleviare i tormenti di una così fiera malattia, stimo che i medici dovrebbero fare nuovi tentativi di applicazione della corrente elettrica continua sui malati di tetano.

La cura elettrica delle paralisi è fondata sopra un tale numero di guarigioni da potersi considerare come una conquista assicurata.

Mi guarderò bene dal descrivervi qui minutamente tutte quelle distinzioni che fanno i medici dati a questa cura speciale fra gli effetti delle correnti, secondo che sono ottenute colla pila direttamente o indotte in modi diversi. Queste distinzioni sono scientificamente così oscure che prima di prenderle in considerazione bisognerebbe essere assicurati, cosa che non è, che si fondano sopra un gran numero di osservazioni ben fatte.

La cura delle paralisi si fa colle correnti interrotte, applicando gli elettrodi sulla cute inumidita delle estremità del membro paralizzato. Secondo i principii esposti, se la paralisi è della sensazione, si dovrebbe usare la corrente diretta, e invece sarebbe da preferirsi la corrente inversa per la paralisi di contrazione.

Importa di cominciare con correnti molto deboli, di sospendere spesso l'applicazione dell'elettricità, di fare da principio applicazioni corte, e via via di prolungare la durata dell'applicazione stessa.

Tutti i medici che con coscienza hanno tentate queste cure elettriche riconoscono che la guarigione non viene che dopo molti e molti giorni di cura, per cui il medico e il malato devono armarsi di pazienza e non disperare per tempo degli effetti dell'elettricità.

LEZIONE QUINTA

(2 *maggio* 1861)

Noi cominciamo oggi la seconda parte di questo Corso, cioè lo studio dell'elettricità sviluppata nel seno dell'organismo vivente. Con questo studio giungeremo a dimostrare che vi sono in natura alcuni animali provveduti di un organo particolare dal quale si svolge costantemente dell'elettricità. Vedremo pur anche che in tutti gli animali vi sono alcuni tessuti che sono veri elettromotori, e che l'elettricità in essi sviluppata è in relazione colle funzioni proprie di questi tessuti.

Prima di procedere in questo studio, io devo esporvi e descrivervi quelli apparecchi e quei metodi che sono necessari per condurci in un campo che era una volta così intricato ed oscuro a risultati rigorosi. È in forza di questi metodi e di questi apparecchi che questa parte dell'elettro-fisiologia è giunta oggi ad essere un capitolo di Fisica generale, fondato sopra esperienze esatte e facili a ripetersi, e in cui ogni giorno le nostre cognizioni si perfezionano e si accrescono.

Questa parte dell'Elettro-fisiologia, quale esiste oggi, ha preso le mosse da due esperienze capitali fatte in due epoche molto lontane fra loro e rimaste senza sviluppo sino al 1840.

La prima di queste esperienze ebbe origine nella famosa lotta fra il Galvani e Volta, sulla fine dello scorso secolo. Galvani dopo aver scoperto che le rane preparate sono un istrumento molto delicato per indicare con forti contrazioni muscolari il passaggio dell'elettricità, deduceva dalle sue esperienze che l'elettricità si sviluppava nel seno degli animali e che i nervi e i muscoli di una rana preparata erano come le due armature di una bottiglia carica, le quali si scaricavano attraverso agli archi metallici con cui quelle parti animali erano messe in contatto fra loro.

Volta, dopo avere inventata la pila, e immaginata la ipotesi della forza elettro-motrice, negò le idee di Galvani sull'elettricità animale e concluse che in tutte le esperienze fatte sulle rane l'elettricità era svolta dagli archi esterni perchè erano eterogeni e che l'animale non faceva che scaricarla.

Galvani oppose a queste conclusioni una esperienza, che è quella che ho chiamato capitale, perchè essa è veramente il punto di partenza dell'Elettro-fisiologia, cioè un fenomeno vero di elettricità sviluppata dall'organismo vivente.

Ecco l'esperienza. Preparata la rana nel modo solito, si ripiega una gamba della medesima in modo da portarla in contatto dei nervi lombari. In quell'istante la rana entra in contrazione, e questo effetto si ripete finchè la rana è eccitabile e tutte le volte che quel contatto si

rinnova. Se si dura un certo tempo a tenere i muscoli ed i nervi in contatto, avviene spesso la contrazione anche nell'istante in cui si interrompe quel contatto.

Galvani con esperienze molto sagaci e ben condotte, che Humboldt e Aldini sopratutto variarono ed estesero sopra altri animali, dimostrò, per quanto in quei tempi si poteva, che se il contatto fra muscoli e nervi accadeva per mezzo di corpi interposti, la contrazione si manifestava solamente quando quei corpi erano conduttori dell'elettricità, e che non avveniva più usando corpi isolanti. Così si ha la contrazione tanto all'aprire che al chiudere del circuito allorchè, tenuta la rana galvanoscopica sopra un piano isolante, si fa in modo che le estremità della gamba e del nervo tocchino uno strato d'acqua o un piano omogeneo e conduttore qualunque. Humboldt soleva mettere un pezzo di muscolo fra il nervo e la gamba della rana galvanoscopica, e anche in questo modo si svegliano le contrazioni. Aldini osservò il fatto stesso della rana scoperto da Galvani, preparando rapidamente sopra uccelli e sopra conigli la gamba col nervo sciatico unito, e ripiegando quel nervo sui muscoli. Aldini variava pure quell' esperienza prendendo colle dita la gamba di una rana galvanoscopica, e portandone il nervo in contatto del cervello o dei muscoli di altri animali vivi. Come facilmente s'intende, così operando Aldini non faceva che ripetere le esperienze prime del Galvani e dell'Humboldt, colla differenza che l'arco fra i muscoli e i nervi della rana galvanoscopica era formato dalla mano e dal corpo dell'osservatore, dalla terra e dagli animali toccati col nervo; perciò la contrazione ottenuta in questo modo non poteva prendersi per segno d'elettricità negl'animali toccati.

Ecco perchè in una delle passate Lezioni io dicevo che conveniva, volendo usare la rana galvanoscopica, sostenerla con un manico isolante e toccare l'elettro-motore che si vuol studiare in due punti del solo filamento nervoso della rana.

Tutte queste varie forme dell'esperienza capitale di Galvani non lasciavano dubbio sulla conclusione dell'esistenza di un' elettricità propria dei muscoli e dei nervi nello stato di vita, nè questa dimostrazione era in alcun modo contraddetta dall'osservazione di Volta, che, cioè i nervi e i muscoli rappresentavano i due metalli della coppia, tutte le volte che era provato che i nervi e i muscoli non agiscono come elettro-motori se non presi sopra un animale vivo o recentemente ucciso.

Nel 1827, cioè circa cinquant'anni dopo Galvani, il Nobili, che aveva allora perfezionato e reso il galvanometro molto sensibile, fece sulla rana preparata alla Galvani la seconda esperienza capitale di cui vi ho fatto cenno. Supponiamo di avere il galvanometro a filo lungo e a sistema astatico come lo aveva immaginato il Nobili; e di cui le estremità sono lamine di platino immerse n due bicchierini pieni d'acqua salata. Prima di cominciare l'esperienza sulla rana, Nobili prende uno stoppino di cotone ben inzuppato di questo liquido e congiunge con esso il liquido dei due bicchierini. Se le due lamine di platino sono omogenee, cosa molto difficile a realizzarsi, l'ago sta fermo; il più delle volte vi è una deviazione, la quale dipende dalla non perfetta omogeneità delle lastre e sopratutto dall'aver esse della polarità secondaria. Lasciato chiuso il circuito, dopo qualche tempo la deviazione si riduce nulla o piccolissima. Allora

Nobili prepara rapidamente una rana alla Galvani, toglie lo stoppino, e vi sostituisce la rana preparata immergendo i nervi lombari in un bicchierino e le gambe nell'altro. In quel momento la rana si contrae e l'ago devia per un arco di 25° o 30° o più gradi e si fissa deviato di un angolo però molto minore e che va sempre decrescendo. Se l'esperienza è rifatta sopra un'altra rana, invertendone la posizione rispetto alle estremità del galvanometro, la deviazione avviene in senso opposto. Nobili si assicurò pure operando sopra due o tre rane egualmente preparate e riunite in forma di pila, toccando cioè assieme i muscoli dell' una coi nervi dell' altra, che la deviazione dell' ago cresceva proporzionalmente al numero delle rane. La conclusione delle esperienze di Nobili era che riunendo con un arco omogeneo i nervi e i muscoli di una rana preparata, si stabiliva in quest'arco una corrente elettrica diretta in modo che i muscoli rappresentavano lo zinco e i nervi il carbone o il platino di una coppia voltiana, per cui la corrente era diretta nell'animale dai muscoli ai nervi o dai piedi alla testa della rana come si suol dire. Questa corrente era, secondo tutte le analogie, la cagione della contrazione osservata nell'esperienza del Galvani.

Nobili non variò abbastanza le sue esperienze per poter giungere ad un'interpretazione esatta del fatto che aveva scoperto, ed anzi condotto da una falsa analogia escluse l'origine vera dell'elettricità, di cui invece aveva rigorosamente dimostrata l'esistenza negli animali. Egli immaginò che i nervi ed i muscoli per la loro diversa struttura e composizione erano corpi che diversamente perdevano l'acqua per evaporazione, per cui dovevano

avere, secondo lui, essendo esposti all'aria, una diversa temperatura; dal che concludeva che la corrente scoperta nella rana era una corrente termo-elettrica fra nervo e muscolo e perciò indipendente dall'organismo vivente.

Per poco che si consideri alle condizioni in cui si è fatta l'esperienza di Nobili, si vede presto come queste condizioni siano diverse ed anzi opposte a quelle nelle quali le correnti termo-elettriche si producono: e d'altronde vedremo in breve che il vero elettro-motore nelle esperienze di Nobili, come in quelle di Galvani, che non sono diverse se non per l'aggiunta del circuito del galvanometro e per essere l' elettricità della rana provata non solo dalla contrazione, ma anche dalla deviazione dell'ago calamitato, non è formato dall'unione dei nervi e dei muscoli, ma dalle varie parti del muscolo solo.

Io mi sforzerò di mostrarvi le leggi dell'elettro-motore muscolare con esperienze semplici e rigorose e perciò devo premettere la descrizione degli istrumenti e dei metodi usati in queste esperienze.

Voi conoscete già la preparazione della rana galvanoscopica e l' uso della medesima. La gamba di una rana rapidamente preparata, e a cui resta unito un lungo filamento nervoso, è posata sopra un pezzo di lamina di gutta-perca; si asciuga leggermente il nervo posandolo sopra un foglio di carta da feltro e indi si tocca il pezzo di muscolo di cui si cerca lo stato elettrico con due punti del nervo stesso. Ripetendo varie volte quest'esperienza, cangiando via via i punti del muscolo toccati dal nervo e tenendo dietro all'istante in cui accade la contrazione si può con qualche fondamento determinare il senso della corrente. In qualche esperienza si può

anche usare la rana intera e divisa a metà, come più volte l'abbiamo descritta nelle lezioni passate e colla quale, se la corrente è abbastanza intensa, è anche più facile di scoprire il senso della corrente, poichè per sollito uno dei membri si contrae quando si chiude il circuito, cioè il membro percorso dalla corrente diretta, e l'altro all'aprire.

Il galvanometro a filo molto sottile e molto lungo con un buon sistema magnetico è l'istrumento essenziale per le ricerche di elettro-fisiologia. Allorchè è possibile di unire molti elementi muscolari in serie, facendone una pila, può bastare un galvanometro di due a tre mila giri; nelle esperienze più delicate, come sono quelle necessariamente fatte sopra un muscolo solo, e quelle della variazione del potere elettro-motore muscolare sotto la contrazione, del potere elettro-motore dei nervi, bisogna ricorrere ad un galvanometro di venti a trenta mila giri.

In ogni esperienza di elettricità animale col galvanometro si sono incontrate sino a questi ultimi tempi delle cagioni d'errore, introdotte dalle lastre con cui terminano le estremità del galvanometro. Infatti appena quest'istrumento fu perfezionato da Nobili, si moltiplicarono le esperienze di elettro-fisiologia, ma pur troppo per non aver avuto cura di studiare convenientemente gli errori introdotti dall'uso di quelle lastre, si cadde in risultati erronei che arrestarono i progressi di questa parte della Fisica. Quanto più il galvanometro era delicato, tanto più era necessario di ricorrere ad un metodo che fosse al coperto delle correnti estranee dovute alle estremità del galvanometro e alle azioni chimiche dei liquidi posti in contatto di queste estremità. Non è

quindi necessario che vi parli dell'esperienze di elettro-fisiologia fatte usando per estremità del galvanometro lamine di ferro, d'argento o di rame, messe direttamente in contatto dei muscoli, del cervello, o del midollo spinale di un animale vivo. Forse in alcune di queste esperienze gli effetti ottenuti al galvanometro saranno da attribuirsi al potere elettro-motore di quelle parti, ma il più delle volte, come lo dicono l'incertezza della direzione e la varia intensità delle correnti ottenute in circostanze eguali, quelli effetti dipendono o da polarità secondarie o da etereogeneità delle lastre o dall'azione diversa dei liquidi animali in contatto della medesima. Queste incertezze e queste irregolarità non sono veramente scomparse se non quando abbiamo colle pile muscolari accresciuta l'intensità delle correnti e meglio ancora quando siamo riesciti a togliere intieramente le polarità secondarie delle lastre del galvanometro.

È facile di concepire il metodo delle pile muscolari. Per ora l'elemento muscolare che conosciamo è la rana preparata col metodo di Galvani ed usata nelle esperienze di Nobili. Supponiamo di avere un certo numero di queste rane press' a poco della stessa vivacità ed egualmente preparate. Distendiamole sopra un piano isolante disponendole in pila, cioè mettendo le gambe di una rana in contatto delle gambe di una rana successiva. Le estremità del galvanometro usate in principio, erano due lamine eguali di platino saldate ai fili di rame; ognuna di queste lamine ha un manico isolante d'avorio o di guttaperca ed è coperta da una vernice di cera lacca tanto che resti scoperta solamente una piccola porzione egualmente estesa della loro superficie. Le due lamine devono essere

state prima lavate colla potassa, poi in un acido allungato, poi nell'acqua distillata più volte, e indi lasciate immerse insieme per lungo tempo in questo liquido o in una soluzione di sal marino. In questo modo si giunge ad ottenere che le lastre sieno omogenee e non diano correnti; pur troppo però, o agitandole o immergendole disugualmente nel liquido, insorgono di nuovo delle correnti.

Disposte le rane, come già vi mostrai, a pila, le due estremità di esse, cioè i nervi da una parte e le gambe dall'altra, si fanno pescare in piccole cavità che si riempiono di acqua distillata o salata. Quando si è giunti ad ottenere omogenee le lastre di platino del galvanometro, allora si chiude il circuito della pila muscolare immergendole nelle cavità estreme della pila stessa. Si ha allora una corrente che usando otto o dieci elementi e un galvanometro di soli due mila giri, è tanto forte da far fare all'ago tutto il quadrante. Si può così dimostrare che la deviazione cresce col numero degli elementi e che la direzione della corrente ottenuta da questa pila è indipendente dalla natura del liqnido in cui pescano le estremità della pila. Questi risultati soli hanno messo fuori di dubbio per la prima volta, che le correnti così ottenute non dipendono dall' eterogeneità delle lastre del galvanometro o dall'azione dei liquidi animali su quelle lastre: in una parola le esperienze colle pile muscolari hanno fornita la prova la più sicura dell' esistenza dell' elettricità propria dei muscoli degli animali vivi o recentemente uccisi.

Du-Bois Reymond, a cui si devono tante esperienze importanti di Elettro-fisiologia, fu il primo a costruire e ad usare un galvanometro a filo molto sottile e lungo che fa venti mila giri almeno intorno agli aghi. Egli

perciò potè studiare l'elettricità muscolare senza ricorrere alle pile, ciò operando sopra un sol pezzo di muscolo.

Le estremità del galvanometro usate da Du-Bois Reymond erano due lastre di platino immerse nell'acqua salata. Questo liquido è contenuto in due piccoli bicchierini di vetro, in ognuno dei quali un grosso strato di flanella o di carta da feltro esce fuori dal bicchierino e si ripiega orizzontalmente per un piccolo tratto. Queste due appendici di carta o di flanella dette *cuscinetti*, essendo imbevute del liquido dei bicchierini servono a chiudere il circuito allorquando sono messe in contatto, ciò che si fa toccandole direttamente o meglio posando sopra di esse un terzo cuscinetto egualmente imbevuto dello stesso liquido. Dopo essersi assicurati che non vi é corrente fra le lastre, si toglie il terzo cuscinetto e si sostituisce la rana preparata, ciò che si fa posandola coi nervi sopra il cuscinetto di un bicchiere e colle gambe sul cuscinetto dell'altro bicchiere. Si ha allora una fortissima deviazione nell'ago dovuta alla solita corrente, che Nobili chiamava la corrente della rana, diretta dai piedi alla testa nell'animale.

Qualunque però di questi modi di operare sia scelto, cioè la pila di muscoli col galvanometro meno delicato, o un muscolo solo col galvanometro molto sensibile, si nota sempre che l'uso delle lastre di platino rende l'esperienze imperfette e qualche volta erronee. Infatti si osserva, sopratutto usando una rana sola e il galvanometro molto sensibile, che mentre la prima deviazione d'impulso è molto grande, per poco che l'ago duri ad oscillare esso si fissa deviato di pochi gradi e non sta fermo, ma anzi prontamente discende verso lo zero. È facile allora

di assicurarsi che questi effetti non dipendono già dal-
l'indebolimento dell'elettricità della rana, ma da un fe-
nomeno fisico che già conosciamo, cioè dallo sviluppo
delle polarità secondarie sulle lastre di platino, per le
quali è creata una forza elettro-motrice contraria a quella
delle rane. Infatti tolgo la rana e chiudo il circuito
toccando direttamente i cuscini e vedo subito una de-
viazione in senso contrario a quella ottenuta dalla rana.
Queste polarità secondarie sono dunque una imperfezione
in queste esperienze e perchè indeboliscono rapidamente
le correnti animali e perchè creano delle eterogeneità
sulle lastre, le quali non facilmente si dileguano e che
possono introdurre errori nelle esperienze successive. For-
tunatamente noi possediamo oggi un metodo in cui queste
imperfezioni sono tolte. Vi mostrava giorni sono come
facendo passare una corrente per due elettrodi di platino
in una soluzione salina, questi, cessata la corrente della
pila, davano al galvanometro una forte corrente secon-
daria in senso opposto; vi dissi pure che questa corrente
era dovuta ai prodotti dell'elettrolizzazione che si rac-
coglievano sugli elettrodi di platino e alle loro azioni chi-
miche per ricombinarsi in seno al liquido. Eccovi ora l'e-
sperienza con cui si prova che una corrente può essere
trasmessa in un liquido per mezzo di elettrodi metallici
senza poi generare polarità secondarie. Invece di elet-
trodi di platino uso delle lastre di zinco perfettamente
amalgamate e ricoperte di mercurio, immerse in una so-
luzione satura di solfato di zinco neutro. Vediamo prima
l'esperienza e ci sarà facile di spiegarne il risultato. Fo
passare la solita corrente; poi richiudo il circuito fra le
sole lastre e non vi è traccia di corrente. Il solfato di zinco

è decomposto, cioè l'ossigene e l'acido solforico vanno sulla lastra positiva e formano del solfato di zinco che immediatamente è disciolto nel liquido e lo conserva saturo come prima; al polo negativo si precipita dello zinco il quale trovando un eccesso di mercurio si amalgama e lascia la lastra press' a poco nello stato di prima. Non vi è dunque per il passaggio della corrente nessuna alterazione generata nè nel liquido nè negli elettrodi, e questo spiega la mancanza delle polarità secondarie.

È dunque oggi generalmente adottato in tutte le esperienze d'Elettro-fisiologia fatte col galvanometro di avere due lastre di zinco amalgamato, saldate alle estremità del filo di rame e immerse in una soluzione satura di solfato di zinco neutro che riempie i due bicchierini muniti dei cuscinetti descritti. Ho introdotto recentemente una modificazione utile e che voglio mostrarvi. Invece di lastre di zinco uso un amalgama di zinco che riempie a metà un tubo di vetro piegato ad U, ma con diametro molto diverso nelle due branche: nel tubo stretto pieno di amalgama introduco i fili di rame del galvanometro. Sull'amalgama, che è nel braccio largo, verso una soluzione satura di solfato di zinco, sino a riempirlo quasi interamente; ognuno di questi ha un beccuccio largo e schiacciato a becco d' anatra nel quale il liquido si distende in uno strato sottile e vi fa l' officio di cuscinetto. Con questa modificazione durano le appendici metalliche ad essere omogenee senza rinnovare l' amalgamazione ed è evitato l' imbrattarsi dei cuscinetti coi liquidi che bagnano i pezzi di muscolo, inconveniente che costringe a lavare spesso i cuscinetti stessi nella soluzione del solfato. Voglio mostrarvi un' esperienza per persuadervi

come in questo modo sono evitate le polarità secondarie. Metto un piccolo corpo qualunque, per esempio un pezzetto di vetro, contro l' ago del galvanometro per impedire che sia deviato dalla corrente di una rana o meglio da una pila di rane. Questo ostacolo non impedisce all' ago di deviare nel senso opposto, cioè in quello in cui devierebbe per la polarità secondaria chiudendo il circuito fra i due bicchierini soli, subito dopo tolte le rane. Fò passare infatti una corrente della pila di sei od otto rane e m' accorgo che passa, vedendo l'ago accostarsi e premere contro l' ostacolo. Dopo alcuni secondi o minuti primi, se si vuole, tolgo la pila muscolare e immediatamente dopo tocco i bicchierini assieme e non ottengo alcun segno di deviazione. Concludo dunque da questa esperienza che il mio metodo rende queste esperienze di Elettro-fisiologia indipendenti dalle polarità secondarie. Infatti, voglio anche mostrarvi che facendo passare la corrente di una rana con questi elettrodi di zinco, l'ago si fissa presto, e indica una deviazione quasi fissa che è molto maggiore di quella che si otterrebbe usando elettrodi di platino nell' acqua distillata o leggermente salata.

Ricorderò finalmente dando termine a questa esposizione del metodo sperimentale, che per paragonare il potere elettro-motore di due pezzi di muscolo o di altro tessuto animale ho sempre usato con successo costante e sicuro il principio dell' opposizione che già vi ho accennato. Perciò si posano i due elettro-motori sul solito piano di gutta-perca facendoli comunicare assieme e in modo che le loro correnti sieno dirette in senso contrario. Allora toccando le estremità di questa doppia pila coi due cuscinetti del galvanometro si avrà, se vi

è differenza di potere elettro-motore, una corrente differenziale nel senso dell' elettro-motore più forte, che sarà indipendente dalla resistenza interna. Volendo poi misurare in qualche modo il potere elettro-motore dei diversi elementi muscolari, si usa, come Giulio Regnault l' ha fatto per il primo, *una unità elettro-motrice*, che può essere una coppia termo-elettrica, bismuto e rame, in cui le unioni sono mantenute a una differenza costante di temperatura, essendo una a 0° e l' altra a 100°. Allora il potere elettro-motore di un muscolo o di un altro tessuto animale è espresso dal numero delle unità elettro-motrici necessario perchè non vi sia corrente differenziale.

Dopo essermi così lungamente intrattenuto a descrivervi come si fanno esperienze esatte e rigorose sugli elettro-motori muscolari, mi sarà più facile di esporvi con brevità e con chiarezza le leggi di questi elettro-motori.

Un muscolo qualunque preso sopra un animale vivo o recentemente ucciso può essere sottoposto all' esperienza sia prendendolo intero e senza alterarne l' integrità organica, oppure dopo aver tagliato le sue fibre in traverso.

Cominciamo dai muscoli interi. Anche per queste esperienze, sia per la struttura, sia per la tenacità della vita, la rana si presta meglio che qualunque altro animale. È quindi sui muscoli della rana che opereremo, avendo però cura di mostrarvi anche sopra muscoli di altri animali i fatti fondamentali dell' elettricità muscolare. Qualunque sia il muscolo intero che si sceglie, esso sarà sempre terminato alle sue estremità dalle appendici ten-

dinose che gli anatomici considerano come continuazione delle fibre stesse e quindi applicate sulle basi delle fibre muscolari. Una massa muscolare sarebbe perciò un fascio di fibre cilindriche sulle cui basi o sezioni traverse vengono ad impiantarsi in continuazione loro le fibre tendinose.

Non starò qui a descrivervi tutte le esperienze che sono state necessarie per analizzare convenientemente il fatto scoperto da Nobili e per giungere a stabilire, che l'elettro-motore animale non consiste già nell'insieme dei muscoli e dei nervi, come si era creduto, nè in tutta la massa dei muscoli dell'animale intero, ma che invece ognuno dei muscoli è un elettro-motore distinto, per cui mettendo in circuito un'intera rana o un intero animale si fanno agire tutti questi muscoli a un tempo. La corrente che si ottiene dall'intera rana dipende perciò dalle intensità e dalle direzioni delle varie correnti che si sovrappongono.

Volendo fare un'esperienza semplice, si distacca dalla rana intera un muscolo più intero e più intatto che sia possibile; tali sono il gastrocnemio o meglio alcuni piccoli muscoli delle membra superiori. Si compone facilmente con questi muscoli una pila disponendoli in serie e allora con un galvanometro, anche non tanto delicato, si hanno i segni di una corrente che cresce col numero degli elementi e che è diretta come quella della rana intera.

Usando una pila di gastrocnemi o di altri muscoli, si vedrà che la corrente ha sempre la stessa direzione sia toccando colle lastre di platino direttamente le estremità della pila muscolare, sia interponendo strati di carta o di flanella umidi e imbevuti di liquidi diversi.

Se invece di usare dei gastrocnemi soli, messi in con-

tatto l'uno dell'altro, si usano dei gastrocnemi a cui è unito il filamento nervoso, si otterranno egualmente i segni della corrente del gastrocnemio, ma saranno molto più deboli per la grande resistenza che introduce nel circuito il nervo.

Facendo l'esperienza con maggiore attenzione e scegliendo sopra tutto dei muscoli di cui le estremità tendinose sieno le più eguali possibile, si giunge finalmente a stabilire qual è la forma la più semplice dell'elettromotore muscolare e quale è la legge di questo elettromotore.

Supponiamo di operare col galvanometro molto delicato, di cui le estremità sono quelle che abbiamo descritto, cioè delle lastre di zinco amalgamato immerse nella soluzione di solfato di zinco e usiamo i bicchierini descritti o col beccuccio semplice, o coi cuscinetti di flanella. Si posa il muscolo, che deve essere il *grande adduttore* perchè l'esperienza riesca meglio, sopra il sostegno di gutta-perca e si porta colle sue estremità tendinose in contatto dei cuscinetti. Di rado si riesce a non avere segno alcun di corrente, ma è certo che è molto più debole di quella che si ha toccando or l'una or l'altra estremità tendinosa con uno dei cuscinetti e la superficie o la zona mediana del muscolo coll'altro cuscinetto. Lo stesso risultato si verifica toccando due punti simmetrici del muscolo egualmente lontani dalle estremità. Questo fatto è costante e generale, cioè si verifica sopra tutti i muscoli interi e qualunque sia l'animale sopra cui si opera, di modo che si può considerare come perfettamente stabilita dall'esperienza la proposizione seguente: *qualunque sia il muscolo intero su cui si opera,*

se questo muscolo è vivo o preso sopra animale recentemente ucciso, si ottiene una corrente in un arco omogeneo che colle sue estremità tocca una delle estremità tendinose del muscolo e la superficie del muscolo; questa corrente è costantemente diretta nell' arco esterno dalla superficie del muscolo al tendine e la sua intensità diminuisce a misura che ambedue le estremità dell' arco si separano fra loro per accostarsi alle estremità del muscolo.

Questa proposizione convenientemente applicata comprende tutti i casi di correnti ottenute dai muscoli interi e si verifica operando sopra muscoli di rane, d'insetti e di animali a sangue caldo, con differenze d'intensità e di durata dopo la morte, che dipendono da leggi che avrò cura di esporvi in seguito.

Già si disse che la corrente ottenuta dal Nobili operando sulla rana intera era in qualche modo la somma algebrica di tutte le correnti dei tanti fasci muscolari che compongono l' animale e che entrano nel circuito nello stesso tempo. Basterà di formare una doppia pila opponendo un solo gastrocnemio ad una metà intera di rana, per ottenere nel galvanometro una forte corrente differenziale nel senso del gastrocnemio solo.

È inutile di aggiungere che con una pila formata di 10 o 12 gastrocnemi ho potuto ottenere una corrente tanto intensa da caricare il condensatore e da dare segni di decomposizione elettro-chimica.

La corrente di cui ci siamo occupati sin qui, trovata nei muscoli interi, è evidentemente la causa della contrazione che avviene nell' esperienza di Galvani, toccando i muscoli della gamba coi nervi lombari. Questa cor-

rente andando dai piedi alla testa nella rana è per i nervi lombari *inversa*, cioè in quel senso in cui abbiamo visto prevalere la contrazione all' aprire del circuito. Abbiamo invece osservato, ripetendo l' esperienza di Galvani, che la contrazione più frequentemente si ha quando i nervi e i muscoli si toccano e non nell' atto in cui questo contatto cessa. Per ispiegare questo risultato, che si direbbe contrario alla legge che già abbiamo stabilita sull' azione fisiologica della corrente secondo la sua direzione, dobbiamo osservare, che facendo l' esperienza di Galvani, non avviene di tener chiuso il circuito per un certo tempo, mentre che questa condizione è necessaria per ottenere la contrazione all' aprire, allorchè il nervo è percorso dalla corrente inversa. E infatti se si ripete l' esperienza di Galvani prolungando il contatto, si riesce allora generalmente ad ottenere la contrazione quando la corrente cessa. Il professore Cima ha indicato una maniera sicura per ottenere colla corrente della rana la contrazione all' aprire del circuito. Egli prende la rana galvanoscopica, la sostiene con un manico isolante e poi immerge nell' acqua e nel tempo stesso la zampa e l' estremità del filetto nervoso che pende in basso. Allora si ottiene, tenendo ogni volta chiuso il circuito per alcuni secondi, da prima la contrazione al chiudere e all' aprire del circuito, e poi la contrazione solamente all' aprire.

Passiamo ora alla corrente elettrica ottenuta sui muscoli a cui sono tagliate le fibre.

La prima esperienza di questo genere che sia stata tentata è quella che vi mostro e che è fatta usando la rana galvanoscopica rapidamente preparata, tenuta al

solito sul manico isolante di gutta-perca. Prendo un' altra rana, un pesce vivo, un uccello, un animale qualunque a cui fo una ferita in una massa muscolare e poscia fo che il nervo della rana galvanoscopica tocchi con due punti diversi l' interno della ferita e la superficie del muscolo. In questo modo non si manca mai di ottenere una contrazione nella rana e facendo l' esperienza con molta cura si può anche riescire a determinare nel modo solito il senso della corrente, cioè la posizione dei poli dell' elettro-motore muscolare.

Usando il galvanometro non molto delicato si accrescono gli effetti della corrente muscolare ottenuta dai muscoli tagliati, formando le solite pile. Gli elementi muscolari, che più facilmente si ottengono, sono le mezze coscie di rane. A questo fine si prepara un certo numero di rane alla Galvani, a cui si tagliano le gambe nelle articolazioni; allora con un taglio traverso alla metà delle coscie si ha, sopra tutto colla metà inferiore, un elemento perfetto: si ottengono pure degli elementi muscolari a fibre tagliate, togliendo la pelle ad un'anguilla e tagliandola traversalmente in tanti pezzi. Si hanno ugualmente gli elementi muscolari colle gambe di uccelli o di mammiferi spellati. Un elemento muscolare si ottiene col cuore di un uccello o di un pesce tagliato a metà, e lo stesso può dirsi di striscie delle masse muscolari pettorali. Qualunque sia l'elemento muscolare così ottenuto, è facile d'intendere come con un certo numero di questi elementi si possa formare una pila muscolare: basta perciò di disporre tutti gli elementi nello stesso senso, facendo cioè che l'interno o la sezione di un elemento tocchi la superficie dell'elemento succes-

sivo. Pile simili sono state costrutte anche sopra muscoli vivi: a questo fine furono fissate sopra una tavola delle rane spellate nelle membra inferiori ad ognuna delle quali era tagliata una coscia a metà. La pila era composta stabilendo il contatto fra la sezione creata col taglio in una rana e la gamba della rana successiva. Un'esperienza simile fu anche ripetuta sopra uccelli. Qualunque di queste pile sia sperimentata, si hanno sempre al galvanometro delle correnti che crescono col numero degli elementi e colle quali si possono ottenere la carica del condensatore e i segni dell'azione elettrochimica sull'ioduro di potassa.

Anche con un pezzetto solo di muscolo tagliato e il galvanometro molto delicato si hanno i segni della stessa corrente muscolare, la quale è costantemente diretta nel muscolo dall'interno o dalla sezione trasversa alla superficie e quindi dalla superficie nella sezione trasversa nel circuito del galvanometro.

Nel modo stesso con cui studiando la corrente sui muscoli interi, vedemmo la corrente essere sempre più debole e divenire anche nulla, allorchè si toccavano le estremità tendinose del muscolo o due punti di esso simmetrici e sempre più prossimi a queste estremità, si vede anche più generalmente la corrente muscolare esser nulla sopra un muscolo avente due sezioni trasversali equidistanti dal suo mezzo e portando le estremità del galvametro nei centri di queste sezioni. L'esperienza può essere fatta tagliando in traverso in due punti equidistanti dal suo mezzo una coscia di rana. Usando il galvanometro delicato e per estremità del galvanometro dei cuscinetti ridotti in punta si può riescire ad operare sopra piccoli

pezzi di fibra muscolare e ad ottenere sopra di essi ciò che si ha da una pila muscolare.

Siamo perciò indotti a generalizzare le esperienze riferite e a stabilire che ogni elemento di fibra muscolare di un animale vivo o recentemente ucciso è un elettromotore.

Du-Bois Reymond considera il poter elettro-motore dei muscoli interi e dei muscoli tagliati sotto un sol punto di vista e come avente la stessa origine. D'accordo colle osservazioni anatomiche moderne si ammette oggi che le estremità delle fibre muscolari, le basi di quelle fibre cilindriche che compongono i muscoli, sono in comunicazione immediata colle fibre tendinose. Questo fa che i tendini possono essere considerati nell' elettro-motore muscolare come una sezione trasversale naturale. Quindi Du-Bois Reymond chiama l' interno o il taglio di un muscolo *sezione trasversale artificiale, e sezione trasversale naturale* il tendine. Per completare questa definizione, lo stesso fisiologo chiama la superficie del muscolo *sezione longitudinale naturale*, ed ammette che si possa anche ottenere, ciò che è assai difficile in pratica, una sezione longitudinale artificiale. Premesse queste definizioni, ogni elettro-motore muscolare è abbracciato sotto questa formula generale: *qualunque punto della sezione longitudinale naturale o artificiale di un muscolo è positivo rispetto ad ogni punto della sezione trasversale naturale o artificiale.*

Noi dovremo ora occuparci di esaminare l'elettro-motore muscolare nelle sue analogie coi diversi elettro-motori che possediamo in Fisica: dovremo tentare di gettare qualche luce sulla maniera di agire di questo elettro-

motore. Ma prima di ciò e nell'interesse stesso di questa ricerca teorica, devo esporvi le leggi dell' elettricità muscolare, cioè le sue relazioni colle proprietà fisiche e fisiologiche del muscolo.

La prima proposizione relativa alla condizioni fisiche del muscolo é la seguente.

Il potere elettro-motore del muscolo è indipendente dalla grossezza del muscolo stesso o dalla grandezza della sua sezione trasversale, ed è invece proporzionale alla lunghezza del muscolo.

Tanto questa proposizione, quanto le seguenti, sono fondate sopra esperienze molto nette eseguite col metodo dell' opposizione già descritto. Così per la prima parte di questa proposizione basta di preparare un certo numero di mezze coscie di rana e di comporne una pila doppia formata da una parte di una sola mezza coscia, e dall'altra di cinque o sei elementi che si sovrappongono tutti nello stesso senso. Da questa doppia pila non si ha mai corrente differenziale o è piccolissima e indifferentemente nel senso di un elemento solo o degli elementi riuniti. Si verifica questo stesso risultato paragonando degli elementi muscolari di rane di grossezze molto diverse fra loro; se non che in questo caso si trova che quasi sempre la corrente differenziale è nel senso del muscolo più grosso, del che in breve vedrete la ragione.

Egualmente si opera per dimostrare che la corrente muscolare è proporzionale alla lunghezza del muscolo.

Preparata una doppia pila opposta formata con due mezze coscie, dopo essersi accertato dell'eguaglianza di questi due elementi, si pratica sopra ognuno di essi un nuovo taglio trasverso paralellamente al primo, colla differenza

che per uno degli elementi il taglio si riduce a togliere uno strato molto sottile, mentre invece per l'altro questo taglio deve ridurre l'elemento a non aver più che un terzo o un quarto della lunghezza primitiva. Si ricompone la pila e si ha allora una corrente differenziale nel senso del muscolo più lungo. Questo risultato si ottiene anche coi gastronemi e coi muscoli lunghi del dorso del coniglio.

Da ciò la spiegazione dell'osservazione fatta da Du-Bois Reymond della corrente ottenuta toccando due punti non simmetrici della stessa sezione trasversale. Questa corrente c'indica che i punti di questa sezione più vicini al centro agiscono come la sezione trasversa e si comportano rispetto ai punti più lontani dal centro, come se queste ultimi appartenessero alla superficie del muscolo. In realtà le fibre del centro sono più lunghe delle fibre poste presso l'orlo della sezione trasversale, e la corrente trovata è conforme alla proposizione che vi ho esposta.

Passiamo ora alle leggi fisiologiche della corrente muscolare, ed anche in questo, per esser breve, riassumerò i fatti ben stabiliti che abbiamo sotto forma di proposizioni.

PRIMA PROPOSIZIONE.

La forza elettro-motrice del muscolo presa sopra un animale vivo o recentemente ucciso è maggiore per i mammiferi e per gli uccelli che nei pesci e nei rettili. Questa forza decresce rapidamente dopo la morte, ma in un ordine inverso quanto alla serie animale e ciò con differenze molto grandi. L'elettricità muscolare varia perciò come la così detta irritabilità muscolare.

Siccome questa irritabilità si spegne per i mammiferi e per gli uccelli sopra tutto rapidissimamente in un muscolo separato dell'animale, bisogna operare con molta prontezza per dimostrare la prima parte di questa proposizione. Perciò, preparata una mezza coscia di rana, si strappa una coscia sopra un uccello vivo, si taglia la coscia a metà, si toglie la pelle e si forma subito la doppia pila cogli elementi opposti della rana e dell'uccello. Nel maggior numero dei casi la corrente differenziale è nel senso del muscolo dell'uccello.

Basta di lasciar passare qualche minuto perchè, ricomposta la pila, si vegga insorgere la corrente differenziale nel senso opposto, cioè in favore dei muscoli della rana.

Anche Giulio Regnault misurando colle unità termo-elettriche i poteri elettro-motori dei muscoli di coniglio e della rana, trovò nei primi istanti dopo la morte che prevaleva il muscolo del coniglio.

Ho fatto questi confronti operando sopra animali vivi e con risultati anche più decisivi.

SECONDA PROPOSIZIONE.

Il nervo non esercita direttamente alcuna influenza sul potere elettro-motore del muscolo.

Noi abbiamo già visto che lasciando agli elementi muscolari il filamento nervoso e introducendolo nel circuito non si fa che indebolire la corrente muscolare.

Allorchè si forma la pila opposta con due elementi muscolari, l'uno senza nervo e l'altro col nervo messo in circuito, siccome per questa disposizione la resistenza interna è esclusa, non si ha corrente differenziale, ciò che significa che la forza elettro-motrice del muscolo è indipendente dalla presenza del nervo. Si può anche sperimentare sopra pezzi di muscolo a cui è stato lasciato ora il nervo che vi si ramifica, ora il nervo che ne esce. In ambidue questi casi si trova che il nervo non agisce che come farebbe un pezzo di filo umido e cattivo conduttore, in contatto di una certa parte del muscolo.

Sotto questa proposizione potrebbero comprendersi i risultati ottenuti studiando di confronto muscoli sani e muscoli avvelenati coi narcotici. Il risultato generale è che il potere elettro-motore dei muscoli di questi animali, se sono morti dopo avere subìto delle contrazioni più o meno violenti e prolungate, è diminuito. Lo stesso accade nei muscoli degli animali uccisi col curaro. Noi vedremo in seguito parlando dei fenomeni elettrici della contrazione muscolare come siamo riusciti ad interpretare la diminuzione del potere elettro-motore dei muscoli nei quali, per l'azione del veleno, si sono svegliate delle contrazioni.

TERZA PROPOSIZIONE.

Tutte le azioni fisico-chimiche che modificano l'irritabilità muscolare agiscono egualmente sul potere elettromotore dei muscoli.

Io mi contento di mostrarvi due o tre esperienze ben nette che dimostrano in varii casi questa proposizione.

Noi abbiamo qui due vasi di rane; in uno vi sono alcune rane fresche e che sono state tolte da poche ore dalle acque paludose dove vivono naturalmente, e nell'altro vi sono rane prese da varie settimane e che sono per conseguenza molto indebolite. Sia che si operi sopra gastrocnemi o sopra delle mezze coscie, troveremo costantemente col solito metodo della doppia pila una corrente differenziale che proverà che il potere elettro-motore dei muscoli delle rane fresche è maggiore di quello dei muscoli delle rane che chiamerò indebolite. Costantemente l'effetto dell'indebolimento si manifesta più sul gastrocnemio che sulle mezze coscie.

Posso anche mostrarvi in un modo molto distinto l'influenza del raffreddamento sui muscoli. Preparo sopra diverse rane un certo numero di gastrocnemi e una porzione di questi introduco in un tubo di vetro che immergo in un miscuglio frigorifico di ghiaccio e sale. Dopo due o tre minuti compongo le solite pile doppie con un gastrocnemio che non è stato nel miscuglio frigorifico e con un gastrocnemio che fu esposto al raffreddamento. Ottengo costantemente una forte diminuzione nel potere elettro-motore per l'effetto del raffreddamento.

Prolungando il raffreddamento per 15 o 20 minuti, i muscoli perdono affatto questa proprietà, mentre col raffreddamento di breve durata essi riacquistano, riprendendo la temperatura ordinaria, una porzione della forza elettromotrice. Un effetto analogo a quello dell' abbassamento di temperatura è prodotto dal riscaldamento. Così si spiega, almeno in parte, perchè le rane tanto nel forte dell'inverno, come nella stagione molto calda danno coi loro muscoli delle correnti elettriche molto più deboli che nelle stagioni intermedie.

Ho voluto provare se i muscoli interi, o i muscoli tagliati e lasciati per un certo tempo nel gas idrogene, nell'ossigene, nell'acido carbonico, nel vuoto della macchina pneumatica, soffrivano variazioni nel loro potere elettro-motore. Non ho riscontrato differenza, e quella trovata operando nel gas idrogene dipendeva dall'effetto di questo gas sulle polarità secondarie delle estremità di platino del galvanometro. È possibile che l'azione di questi gas sulla nutrizione e sulla respirazione muscolare debba alla fine avere una certa influenza sul potere elettro-motore dei muscoli; ma quest'effetto sarà lento a manifestarsi.

L'azione del gas nitroso e dell' idrogene solforato è invece distinta. Facendo morire le rane, od anche degli animali a sangue caldo, per l'inspirazione di questi gas si trova che il potere elettro-motore dei loro muscoli è indebolito. Lo stesso deve dirsi delle rane morte dopo molte ore di soggiorno nell'acqua bollita e privata d'aria.

Finalmente fu studiato quale era l'effetto dell'immersione dei muscoli in diversi liquidi sul potere elettromotore muscolare. Il primo effetto che si verifica in questa

immersione se molto breve, nell'acqua salata e nella soluzione di solfato di soda o di magnesia, è l'aumento del potere elettro-motore. Infatti usando il metodo differenziale e confrontando un muscolo che non fu immerso con un muscolo che fu immerso in quei liquidi, se si trova, come infatti accade spesso, una corrente differenziale, essa è nel senso dei muscoli che furono immersi in quei liquidi. Quest'effetto non può essere spiegato col solo aumento della conducibilità dovuto a quei liquidi, ma bisogna ricorrere all'accresciuta forza elettro-motrice. E qui bisogna notare che quei liquidi conservano il color rosso dei globuli del sangue e devono perciò accrescere gli atti chimici della nutrizione.

Prolungando per un maggior tempo l'immersione d'un muscolo in un liquido qualunque, l'effetto costante e generale è l'indebolimento e alla fine la scomparsa del potere elettro-motore molto prima di quello che accadrebbe nei muscoli lasciati all'aria.

Dopo avervi esposte le leggi dell'elettricità muscolare, dovrei ora darvi la teoria di questo elettro-motore animale. Quale è la sua forma? Quale è la sua maniera d'agire? Con quale degli elettri-motori conosciuti in Fisica il muscolo vivo ha analogia? Pur troppo devo confessarvi che malgrado i molti studi fatti sull'elettricità muscolare non siamo in grado di dare nessuna risposta soddisfacente a queste questioni.

Noi sappiamo che un pezzetto, anche molto piccolo, e quindi per analogia ogni fibra elementare muscolare, se è presa sopra un animale vivo o recentemente ucciso, è un elettro-motore di cui la corrente ha una direzione determinata nella fibra muscolare che si considera.

Sappiamo che questo potere elettro-motore cresce colla lunghezza della fibra o col numero degli elementi muscolari organicamente riuniti.

Sappiamo finalmente che questo potere elettro-motore varia come l'irritabilità muscolare. Noi siamo così indotti a concludere che anche il potere elettro-motore dei muscoli ha la sua origine negli atti chimici della respirazione muscolare.

Tutto questo però nulla ci dice sulla forma dell'elettromotore muscolare, nè se le correnti che noi troviamo col galvanometro sono correnti derivate, cioè se gli elettromotori muscolari essendo sempre in azione, le loro correnti si scaricano attraverso ai liquidi o ai tessuti che inviluppano il muscolo. Certo è che le correnti ottenute sulla rana che ha ancora la pelle sono più deboli che quelle che si hanno negli stessi punti dalla stessa rana, tolta la pelle, e che egualmente avviene coprendo un muscolo con uno strato umido qualunque.

Non dimentichiamo mai che vi è nell' elettro-motore muscolare un carattere fondamentale che lo distingue dagli elettro-motori comuni. Le estremità d'un muscolo intero hanno lo stesso stato elettrico, come pure hanno lo stesso stato due sezioni trasversali artificiali, ciò che non può mai avvenire nè in una pila, nè in una spirale elettrodinamica, nè in una batteria di Leida. Noi non possiamo nello stato attuale della scienza farci alcuna idea precisa di questa differenza, nè più facilmente riesciamo ad intendere perchè la mezza coscia, che è un muscolo terminato da due sezioni trasversali, una naturale e l'altra artificiale, le quali dovrebbero avere lo stesso stato elettrico, sia invece un elettro-motore potente. Male s'in-

tende anche perchè coll'indebolimento delle facoltà vitali la mezza coscia perde assai più del gastrocnemio. Lo ripeto; finchè la forma dell'elettro-motore non ci sarà nota non riesciremo a rischiarare queste singolarità che hanno per ora l'apparenza di anomalie.

Du-Bois Reymond ha immaginato uno schema dell'elemento elettro-motore, paragonandolo ad un cilindro di zinco di cui le basi sono di rame. Una serie di questi cilindri immersi in un liquido acido produrrebbe, immergendo le estremità del galvanometro nei vari punti di questo liquido, delle correnti dirette come si hanno dai vari punti del muscolo. Ma questa analogia è tutta d'immaginazione. Contraddetta poi dall' esperienza è la spiegazione che Liebig ha voluto dare, alcuni anni sono, dell' elettricità muscolare, immaginando che vi sono nei muscoli liquidi acidi e liquidi alcalini che reagiscono.

Non darò termine a questa lezione senza dirvi brevissimamente i risultati ottenuti, cercando se altri tessuti organici hanno le proprietà elettriche dei muscoli.

Immergendo le estemità di platino di un buon galvanometro in un frutto, nelle foglie, nel fusto di una pianta, si hanno delle correnti elettriche. Ammettendo che queste correnti siano costanti e indipendenti dalle polarità e dalle eterogeneità di quelle lastre, la spiegazione per ora più probabile di quelle correnti si ha ricorrendo a liquidi di natura chimica diversa, che molto probabilmente si trovano nelle varie parti della pianta, e che reagiscono l'uno sull'altro.

Fu tentato lo studio dell' elettricità sui tendini, sul tessuto del polmone, del fegato, dei reni di animali vivi o recentemente uccisi, e le esperienze ben fatte ci hanno

insegnato che questi tessuti non hanno un potere elettro-motore proprio.

Nei nervi però questo potere elettro-motore esiste, e siccome è molto più debole che nei muscoli (forse 1|8 o 1|10 circa), così Du-Bois Reymond, che lo ha scoperto, ha dovuto, per riescire, impiegare un galvanometro estremamente delicato. La direzione della corrente elettrica nervosa è la stessa che nei muscoli, cioè si ottiene stabilendo un arco omogeneo fra la sezione trasversale artificiale di un nervo e la sua superficie. Allora si ottiene nel galvanometro una corrente diretta nel nervo dalla sezione trasversale alla superficie.

Studiando il potere elettro-motore dei nervi, Du-Bois Reymond ha fatta un'esperienza, che non posso lasciarvi ignorare. Si prende sopra un pollo o sopra un coniglio un lungo filamento nervoso, come sarebbe un pezzo dello sciatico lungo 80 millimetri circa. Si posa questo nervo sopra i due cuscinetti del galvanometro, facendo in modo che una lunga porzione di esso nervo resti penzolone al di là di uno o di amendue i cuscinetti. Siccome i due cuscinetti del galvanometro toccano due punti della superficie del nervo, non vi può essere e non vi è corrente. Ciò fatto, applico i due elettrodi di una pila qualunque nella parte del nervo che pende fuori del cuscinetto, e in questa parte fo' passare una corrente continua. Allora insorge una forte deviazione nel galvanometro, la quale indica che in esso circola una corrente costante, che è diretta nell'intervallo del nervo fra i due cuscinetti del galvanometro, come la corrente esterna della pila. Se il nervo fosse stato anche più lungo, in modo da avere un pezzo pendente al di là dell'altro cuscinetto, e se sopra questa

parte pendente avessi fatto passare la stessa corrente, avrei pure ottenuto la corrente nel galvanometro sempre diretta nel nervo come la corrente della pila.

Du-Bois Reymond ha chiamato stato *elettro-tonico* del nervo quello in cui una corrente che lo percorre mette tutto il nervo anche nelle porzioni che non sono traversate dalla corrente. È questo stato elettro-tonico immaginato che dà luogo alla corrente elettrica che vi ho descritto, o per meglio dire, lo stato elettro-tonico è stato immaginato per dedurne l'esistenza di quella corrente.

Ho in questi ultimi tempi lungamente studiato questi fenomeni, e dopo aver trovato che si producevano meglio e duravano molto di più nei grossi nervi dei mammiferi che in quelli dei rettili, che si ottenevano nei nervi che da molte ore avevano perduto la loro eccitabilità egualmente che nei nervi appena staccati dall'animale vivo, non ho più esitato a credere che lo stato elettro-tonico era un effetto indipendente dal potere elettro-motore e in generale dalla vita del nervo. Vi parlai lungamente in una delle prime lezioni del potere elettro-motore secondario scoperto nei nervi: fenomeno che vi dissi aver il nervo in comune con tutti i corpi solidi porosi imbevuti di un liquido conduttore e che è dovuto alle correnti elettriche che si svegliano fra i prodotti dell'elettrolizzazione deposti sul nervo in contatto degli elettrodi della pila. Vi mostrai pure che nei tratti di un nervo al di là degli elettrodi, cioè nelle porzioni che chiameremo neutre per non essere state percorse dalla corrente, si generano nulladimeno delle correnti dirette appunto come è la corrente della pila fra gli elettrodi. La causa anche di queste correnti secondarie è nota. In contatto

dell'elettrode positivo si separano gli acidi e in contatto del negativo gli ossidi. Ora siccome fra l'acqua e un liquido acido si produce una corrente diretta nel liquido dal-l'acqua all'acido, come pure si produce una corrente fra acqua e un liquido alcalino diretta nel liquido dal liquido alcalino all'acqua, non vi è più difficoltà ad intendere, come nei tratti del nervo al di là degli elettrodi, cioè dove si sviluppa lo stato elettro-tonico, si generino delle correnti secondarie dirette, appunto come quelle che qualificano questo stato, cioè come la corrente della pila.

Ricorderò ancora che queste correnti secondarie si generano dopo un passaggio istantaneo della pila, per cui non è meraviglia se con un galvanometro molto delicato, anche gli effetti dello stato elettro-tonico si manifestano appena la corrente vi comincia a passare.

Per ultimo vi dirò che vi è nella rana, quasi che questo animale fosse consacrato dalla natura a svelare tutti i segreti dell'elettricità animale, un altro tessuto dotato di un forte potere elettro-motore, che è la pelle. Prendiamo la pelle di una rana e dopo averne tagliata una lunga striscia, facciamo con questa un rotolo e finalmente tagliamo questo rotolo in traverso alle due estremità del rotolo stesso; se si toccano i due cuscinetti del galvanometro, l'uno colla sezione trasversale, l'altro colla superficie naturale della pelle, si ottiene, come lo ha visto Budge in questi ultimi tempi, una corrente diretta nel galvanometro dalla sezione trasversale alla superficie della pelle.

È poco probabile che questa corrente sia veramente un fatto d'elettricità animale, e anche la sua direzione

in qualche modo contraria a quella della corrente muscolare, fa crescere questo sospetto. Forse a questo potere elettro-motore della pelle , qualunque esso sia, è dovuta l'antica osservazione che la contrazione dal Galvani ottenuta ripiegando la gamba sul nervo, riesciva meglio colla gamba coperta della pelle che sulla gamba spellata.

LEZIONE SESTA

(5 *maggio* 1861)

Eccomi finalmente all'ultima lezione di questo Corso, nella quale sono ben contento di potervi mostrare sulla torpedine viva uno dei casi i più singolari e i più istruttivi del soggetto di cui ci siamo occupati.

I pesci dotati della funzione elettrica sono, al dire dei Naturalisti, cinque o sei: ma siccome noi non dobbiamo occuparci di questi pesci sotto il punto di vista dei Naturalisti, ma bensì coll'intendimento di dare per quanto si può una teoria della funzione elettrica, noi non ci occuperemo che di quei pesci elettrici ben conosciuti e sui quali si è potuto fare un gran numero di ricerche. Essi sono il Siluro del Nilo, il Ginnoto dell'America meridionale, e la Torpedine che s'incontra frequentemente nell'Oceano e nei nostri mari.

Sin dai tempi d'Aristotele e di Plinio è nota la proprietà che ha la torpedine viva di dare la scossa a chi in qualche modo la tocca e quindi d'intorpidire le membra; di là il nome di *torpedine*, *di tremulo* o di pesce *mago* che si dà a questo pesce nei vari paesi. Il nostro Redi è stato il primo a scoprire che, ciò che egli chiamava virtù *stupefacente* e *dolorifera* della torpedine, ha la sede

in due organi particolari da lui chiamati *organi falcati* e che oggi chiamiamo *organi elettrici*.

Eccovi una torpedine spellata sulla quale da una parte e dall' altra della testa si veggono due masse elittiche schiacciate, che sono riunite all'animale per gli integumenti e per i ligamenti, e per alcuni grossi nervi che si ramificano nell'organo elettrico.

Dopo il Redi lo studio più completo della funzione elettrica della torpedine e del ginnoto è dovuto a Walsh, che fin dal 1773 pubblicò nelle *Philosophical Transactions* una serie di esperienze che sono tutto quello che di meglio si poteva fare in quel tempo per dimostrare coll'uso di archi ora isolanti, ora conduttori, che questi pesci devono la loro proprietà di dar la scossa ad un organo che sviluppa improvvisamente una grande quantità d'elettricità, e che le due faccie opposte di quest'organo sono i due poli, le due estremità di quella batteria animale.

Premesse queste notizie, vi descriverò le proprietà elettriche della torpedine con quella semplicità e con quell'ordine con cui si studia un apparato fisico qualunque.

Per avere la scossa elettrica dalla torpedine e dal ginnoto, bisogna se si lasciano questi pesci nell'acqua, toccare ed anzi stringere colle mani gli organi elettrici. Se è la torpedine, si applica una mano sulla schiena e l'altra sulla pancia, e se è il ginnoto bisogna stringere con una mano la testa e coll'altra la coda. Finchè questi pesci sono molto vivaci, appena pescati, le scosse sono fortissime anche fuori dell'acqua, anzi più forti, perchè, come facilmente s'intende, in mezzo all'acqua una gran parte dell'elettricità passa per il liquido e non per il

corpo dell'esperimentatore. Appena questi pesci sono fuori dell'acqua, forse per l'irritazione e per la sofferenza che provano, sogliono dare un gran numero di scosse molto prossime l'una all' altra e che sono assai incomode; quando il pesce è vigoroso le scosse non differiscono da quelle di una buona macchina elettro-magnetica. Quando il pesce è fuori dell'acqua non tarda però a stancarsi e a dar delle scosse sempre più deboli e più rare: naturalmente questo avviene perchè il pesce s'indebolisce; ma forse anche entra in questo fatto l'istinto che lo avverte di non dare scosse fuori dell'acqua per non provarne sopra se stesso gli effetti. Per quanto l'osservazione sia difficile accade spesso irritando una torpedine fuori dell'acqua con degli archi formati di materie isolanti che la torpedine non dà scosse o ne dà poche, mentre questo non accadrebbe usando degli archi conduttori. Evidentemente la funzione elettrica di questi pesci è per loro un'arme di offesa e di difesa: se sono irritati, sopratutto in vicinanza degli organi, danno la scarica, come pure la danno per intorpedire i piccoli pesci di cui si vogliano nutrire. La descrizione famosa che dà Humboldt della pesca dei ginnoti nei laghi del Brasile prova il vigore con cui questi pesci usano delle loro batterie elettriche per combattere i loro nemici: gli indigeni fanno questa pesca obbligando dei cavalli ad entrare nei laghi, dove accade spesso che alcuni di questi restano vittime delle scariche elettriche dei ginnoti.

Ma intanto molti dei pesci stanchi nel combattimento s'accostano semivivi alla spiaggia, da dove sono tirati fuori con degli arpioni.

Il ginnoto quando si serve dell' organo elettrico per

offendere e per uccidere il pesce di cui vuol nutrirsi, lo fa da fisico: siccome i poli del suo organo sono alle estremità del suo corpo, si ripiega ad arco e cerca di accostarsi più che può colle estremità del suo corpo alla sua vittima. La torpedine, animale schiacciato, come vedete, e che ha i poli del suo organo in contatto della pancia e della schiena, non può usare questa innocente malizia: ma ne fa un'altra; stando generalmente riposto nella sabbia coperto da un piccolissimo strato, è al momento in cui i piccoli pesci, senza vederlo, gli si accostano, che lancia sopra di essi la scarica.

Volendo studiare la scarica della torpedine e mostrarvi i punti del suo corpo sotto i quali risiede l'organo elettrico, basta di tirarla fuori dell'acqua, asciugarla quanto più si può e distribuire sul suo corpo delle rane preparate. Allora si vedranno, sopratutto se si irrita premendola di tanto in tanto sugli occhi, le rane entrare in contrazione, e lasciando stancare l'animale si nota che le contrazioni si vanno ritirando verso quelle parti del corpo che corrispondono agli organi elettrici. Del resto finchè è viva, irritata più o meno fortemente in qualunque punto del suo corpo, finisce per rispondere colla scarica elettrica, e allora si può fare un'esperienza molto istruttiva per provare che la funzione elettrica è messa in giuoco dalla volontà dell'animale. Infatti quando si irrita la torpedine nella coda o nella schiena si ha la scarica alla condizione che il punto irritato e il cervello dell'animale siano collegati assieme per mezzo dei nervi della midolla spinale. Basta di tagliare la midolla spinale in un punto per vedere che non si ha più la scarica dalle irritazioni fatte al di sotto di questo taglio, mentre sussiste per le irritazioni fatte al di sopra del taglio.

Il primo osservatore Walsh e anche Guy Lussac avevano creduto che si potesse provare la scossa senza far arco, cioè senza toccare nello stesso tempo la pancia e la schiena della torpedine. Se la torpedine non è ben isolata dal suolo, s'intende che si avrà la scossa toccando una faccia sola del pesce, perchè l'arco è allora stabilito col suolo e con tutto il corpo dell'osservatore; è cosi che i pescatori s'accorgono che vi sono delle torpedini in mezzo al pesce tirato colla rete fuori dell'acqua, allorchè vi gettano sopra dei secchi d'acqua per lavarlo e ne ricevono in tal modo la scossa.

È facile di provare con un'esperienza rigorosa questa necessità di far arco per avere la scossa. Si asciuga una torpedine viva e si posa sopra un piano ben isolato coi piedi di gutta-perca. Dopo avere disteso sul suo corpo diverse rane galvanoscopiche si tocca l'organo coll'estremità del nervo di una rana galvanoscopica sostenuta col solito manico isolante. Allora ad ogni scarica che la torpedine dà o naturalmente o irritata, entrano in contrazione tutte le rane, meno quella sostenuta col manico isolante. È inutile che aggiunga che se il piano su cui è posata la torpedine fosse perfettamente isolato, cosa difficile ad ottenersi, non sarebbe necessario di tener la rana galvanoscopica col manico isolante. Bisogna però avvertire che la rana galvanoscopica anche isolata si contrae, quando la torpedine dà la scossa, se si distende sull'organo un tratto abbastanza lungo di nervo. Vedremo in breve la spiegazione di questo fatto.

Dopo ciò che abbiamo detto, non avrete più difficoltà a capire come si siano ottenuti dalla scarica della torpedine tutti gli effetti della scarica elettrica istantanea, cioè la

scintilla, la deviazione al galvanometro, la magnetizzazione, il riscaldamento del filo di platino, gli effetti chimici. Tutti questi fenomeni, che studiai lungamente nel 1837, sorpresero allora, perchè è sempre sorprendente di ottenere da un pesce effetti elettrici così distinti, perchè queste scoperte offrivano un nuovo campo allo studio dell'elettricità animale e perchè anche, cosa curiosa e che merita di essere notata, pochi anni prima esperimentatori molto abili ed anche uno dei più grandi genii moderni delle nostre Scienze, Sir Humphry Davy, aveva pubblicato che la scarica della torpedine non faceva deviare l'ago del galvanometro.

Per ottenere facilmente gli effetti elettrici della scarica della torpedine, uso un apparecchio solo e molto semplice, il quale consiste in due piatti circolari di rame, uno dei quali, l'inferiore, ha tre piedi di guttaperca perchè sia ben isolato dal suolo, e l'altro, il superiore, ha pure un manico isolante. Ad ognuno di questi piatti è saldato o fissato a vite un lungo filo di rame. Si piglia una torpedine viva, si asciuga, si posa sul piatto inferiore e si cuopre col superiore. Basta allora di premere un po' leggermente il pesce col piatto superiore per averne la scarica, e quindi per ottenere gli effetti elettrici nel circuito del filo di rame.

Supponiamo di voler ottenere il riscaldamento del filo di platino. Prendo perciò un pezzetto di questo filo, del più fino possibile, e fattane una piccola spirale, congiungo con essa le due estremità del filo di rame unite ai piatti. Obbligando la torpedine a dare diverse scariche di seguito il filo di platino si trova sensibilmente riscaldato.

Per ottenere la magnetizzazione si chiude il circuito colla solita piccola spirale di filo di rame, nella quale si mette un ago d'acciaio: dopo la scarica si trova l'ago magnetizzato e la posizione dei poli indica, come lo vedremo fra poco col galvanometro, la direzione della scarica.

Per ottenere i segni dell'azione elettro-chimica s'uniscono all'estremità d'ognuno dei fili di rame due pezzetti di filo di platino e questi colle loro estremità si posano sopra una carta preparata col miscuglio d'amido e di ioduro di potassio.

Tutte le volte che la torpedine dà la scarica si forma una macchia bleu sotto l'estremità del filo di platino che è unito al piatto che riposa in contatto della schiena della torpedine.

È un poco più difficile di ottenere la scintilla dalla scarica della torpedine, e la ragione è chiara, perchè bisogna che nel momento in cui l'animale dà la scarica vi sia fra le estremità del circuito non comunicazione perfetta, ma un piccolo intervallo d'aria in cui scocchi la scintilla. Fra i diversi modi che ho immaginato a quel fine, meglio di ogni altro riesce quello di riunire uno dei soliti fili di rame ad una grossa lima di ferro e mentre si preme leggermente il pesce col piatto superiore perchè dia la scarica, scorrere coll'altro filo di rame sulla lima.

Operando così nel buio non si tarda a vedere scoccare la scintilla sulla lima. È così che ottenni la scintilla da un ginnoto vivo su cui potei sperimentare a Napoli durante il Congresso Scientifico del 1845.

Vediamo finalmente l'effetto della scarica sul galvanometro. In questo caso conviene d'avere due lamine di platino unite ai fili del galvanometro e toccare con

queste lamine le due faccie dell'organo della torpedine su cui sono distese rane galvanoscopiche. Ogni volta che la torpedine dà la scarica, le rane si contraggono e l'ago del galvanometro indica una brusca deviazione.

Un galvanometro qualunque di 5 o 600 giri e con un sistema discretamente astatico basta per queste esperienze.

Il risultato costante è che nel circuito del galvanometro passa nell'atto della scarica una corrente diretta in esso dalla schiena alla pancia del pesce. Merita di essere notato che inserendo nel circuito del galvanometro uno strato liquido anche lungo e diviso con diaframmi di platino, se il pesce è molto vivace, la corrente indicata dal galvanometro non soffre variazione da questa resistenza introdotta nel circuito.

Se si ha cura di operare dopo aver ben asciugata la superficie del pesce e quando è già un po' indebolito, si giunge presto a provare che la scarica è più forte in quei punti dell' organo che sono i più grossi, cioè in prossimità della linea mediana del pesce. Quindi è che toccando anche colle estremità del galvanometro due punti della stessa faccia di uno degli organi, purchè corrispondano a grossezze diverse, si ha la scarica: se si tocca il dorso la scarica va dai punti più grossi dell'organo ai punti meno grossi; e se si tocca la faccia ventrale dell'organo la scarica va dai punti più sottili dell'organo ai punti più grossi. Per la stessa ragione e colla stessa legge si ha la scarica toccando sulla stessa faccia due punti non simmetrici dei due organi. Perciò anche intendiamo ora perchè la rana galvanoscopica ben isolata si contrae se un lungo pezzo del suo filamento nervoso è disteso sull'organo.

Vi dirò finalmente che tagliato normalmente uno degli organi sopra una torpedine viva si ha pure la scarica nel galvanometro toccando colle estremità di platino due punti del taglio, e che questa scarica è tanto più forte quanto più sono lontani fra loro i punti toccati, rimanendo sempre la stessa la direzione, cioè dal punto più vicino alla schiena al punto più vicino al ventre nell'arco del galvanometro. Insomma i poli o le superfici polari sono la superficie del dorso e quella ventrale dell'organo.

Operando sul ginnoto col galvanometro si ottiene pure una forte deviazione nell'atto della scarica, stando colle estremità in contatto colle estremità dell'animale. Tutte le altre circostanze essendo eguali, cresce la deviazione crescendo la superficie degli elettrodi in contatto del pesce e questo anche si vede distintamente colla torpedine. A misura che si avvicinano fra loro e verso il mezzo del ginnoto le estremità del galvanometro cala la scarica, e lo stesso accade anche quando si prende la scarica colle mani. Col ginnoto la scarica è diretta nel galvanometro dalla testa alla coda.

In questi ultimi tempi, un illustre Chirurgo di cui l'Italia deplora la perdita recente, il Ranzi, recandosi in Egitto, ebbe da me istrumenti ed istruzioni per studiare la scarica del siluro del Nilo, ed al Ranzi si deve la scoperta della direzione della scarica del siluro, scoperta in seguito verificata a Berlino sopra un siluro vivo. In questo pesce, di cui pure il corpo è allungato, i poli dell'organo elettrico sono alle estremità del suo corpo, ma, cosa curiosa, al rovescio del ginnoto il polo positivo è verso la coda e il polo negativo verso la testa.

Dopo avervi così mostrato i fenomeni elettrici della

scarica della torpedine, fenomeni che non possono differire da quelli degli altri pesci elettrici, noi passeremo ora ad esporre i fatti principali su cui si fonda la teoria di questi elettro-motori animali. Se non che è necessario che vi dia prima un cenno della struttura degli organi elettrici. Questa struttura non differisce essenzialmente fra un pesce e l'altro. In generale l'organo elettrico è costituito da un liquido albuminoso contenuto in tante cavità cilindriche o prismatiche le quali hanno un inviluppo membranaceo e sono separate in traverso da tanti setti costituiti da membrane sottilissime. Queste masse o colonne prismatiche sono disposte nella torpedine colle loro basi in contatto della pelle della schiena e della pancia e quindi considerando il pesce nella sua posizione naturale i prismi sono verticali. Nel ginnoto al contrario i prismi sono orizzontali e paralleli all'asse dell'animale ed hanno le loro basi alla testa e alla coda dell'animale. Analoga alla struttura dell'organo del ginnoto è quella dell'organo del siluro.

La composizione chimica della materia dell'organo è quella del liquido che riempie i prismi e le cellule di cui questi sono composti, che è in gran parte una soluzione di albumina: mille parti della sostanza dell'organo della torpedine contengono 903,4 d'acqua. La sostanza dell'organo fresco è neutra e non è che lasciando l'organo a sè per qualche ora all'aria che si vede diminuire di consistenza, farsi quasi fluido e presentare allora una leggera reazione alcalina.

Fanno parte della composizione dell'organo la materia cellulare e una gran quantità di materia grassa contenente del fosforo, la quale è probabilmente dovuta alla gran

quantità di filamenti nervosi che si distribuiscono nell'organo elettrico.

Gli anatomici hanno trovato che i nervi dell'organo elettrico nei diversi pesci hanno una diversa origine. Nella torpedine i nervi dell'organo provengono dal quinto e dall'ottavo paio, mentre che per il ginnoto i nervi dell'organo sono tutti nervi spinali. Il cervello della torpedine è notevole per una grande massa che viene dopo i lobi olfatori, i lobi ottici e il cervelletto, massa che non esiste che allo stato di rudimento nel cervello dei pesci della stessa specie. Questa massa, che si chiama quarto lobo o lobo elettrico, sembra consistere in una espansione della midolla allungata e si compone in parte di fibre elementari che danno i nervi all'organo, e sopratutto di materia grigia e ganglionare.

Hunter ha contato sopra un organo di torpedine 470 prismi: in seguito gli anatomici hanno stabilito che ciascuno di questi 470 prismi contiene circa 2000 cellule sovrapposte. I prismi del ginnoto sono più lunghi assai di quelli della torpedine, perchè vanno quasi da una estremità all'altra del pesce. Il numero dei prismi in ognuno degli organi del ginnoto è molto minore che per la torpedine; però in ognuno di questi prismi si contano circa 4000 cellule o organi elementari.

Risulta da questi numeri che le cellule dell'organo della torpedine sono più piccole di quelle del ginnoto: e infatti 10 diafragmi di un prisma di ginnoto formano un'altezza che è sei volte maggiore di quella che occupano 10 diafragmi nel prisma della torpedine. Anche la superficie delle cellule è molto diversa nei due organi: la cellula del ginnoto ha circa 50 millimetri quadrati di superficie e

quella della torpedine non ha che 6 a 8 millimetri solamente.

In conclusione, la somma totale dei prismi nell'organo della torpedine è circa dieci volte maggiore di quella dei prismi del ginnoto. Si può stabilire con approssimazione che uno dei due organi della torpedine contiene 940000 cellule, mentre l'organo del ginnoto, benchè più grande, contiene solamente 192000 cellule: perciò il volume di una delle cellule del ginnoto è 70 a 80 volte più grande del volume della cellula della torpedine.

I nervi che si distribuiscono nell'organo si ramificano sopra i diafragmi che costituiscono le cellule e sono quindi distesi in piani trasversalmente all'asse dei prismi.

In questi ultimi tempi il Pacini e sopratutto alcuni Anatomici di Germania hanno creduto trovare in ogni diafragma due lamine, una di tessuto cellulare *connettivo*, e l'altro di elementi nervosi che hanno chiamata *lamina elettrica*. Sembrerebbe esistere una relazione fra la posizione di questa lamina elettrica e la distribuzione relativa dei poli nei diversi pesci elettrici. Se questa relazione fosse ben dimostrata e generalizzata, essa ci fornirebbe una cognizione importante per la teoria dell'organo elettrico.

Premesse queste nozioni anatomiche passo a mostrarvi il fatto fondamentale per la teoria di questi elettro-motori. Questo fatto ci condurrà a stabilire che la cellula dell'organo elettrico è l'elettro-motore elementare di quest' organo. A questo fine distacco dall'organo della torpedine viva un pezzetto d'organo, il più piccolo possibile, e ricordandomi della posizione che esso aveva rispetto alle faccie del pesce, applico le estremità del galvanometro sulle basi dei prismi di questo pezzo. Se allora irrito in un modo

qualunque i filamenti nervosi di questo pezzo d'organo, sono certo di ottenerne la scarica e quindi la deviazione dell'ago nel senso stesso con cui si avrebbe dall'organo intero. Questa esperienza si può fare sopra un pezzetto d'organo non più grande della testa di un spillo; si posa sopra questo pezzetto il nervo della rana galvanoscopica e con forbici finissime s'incide quel pezzetto e si vede allora la contrazione della rana.

Fra gli stimoli da applicarsi ai nervi dell'organo elettrico fu naturalmente studiata la corrente elettrica. Perciò si distacca rapidamente uno degli organi da una torpedine viva e si mettono allo scoperto per un certo tratto i diversi nervi che in esso si distribuiscono. È utile di tenere sollevato ognuno di questi nervi con un filo di seta: per scoprire le scariche svegliate nell'organo si distribuiscono sulla sua superficie delle rane galvanoscopiche. Allora si fa passare una corrente elettrica, ora nell'uno, ora nell'altro di questi nervi. La scarica ottenuta è costantemente nel senso solito, cioè dal dorso al ventre nel galvanometro. Irritando separatamente diversi nervi dell'organo le contrazioni delle rane mostrano che la scarica avviene ogni volta nella porzione dell'organo in cui quel nervo si ramifica.

Merita di essere notato che la scarica dell'organo elettrico si comporta sotto l'irritazione prodotta dalla corrente nei nervi dell'organo come la contrazione muscolare.

Da principio, appena l'organo è staccato dall'animale, vi è la scarica dell'organo tanto all'aprire, quanto al chiudere del circuito, qualunque sia la direzione della corrente; allorchè l'eccitabilità dei nervi è indebolita non si ha più la scarica che al principio della corrente diretta e alla fine dell'inversa.

Ho cercato di scoprire se la funzione dell'organo elettrico era accompagnata da variazione di volume o di forma dell'organo elettrico. Perciò colloco la torpedine in un recipiente di vetro, che è pieno d'acqua e che è chiuso esattamente con un turacciolo di sughero: attraverso al turacciolo passano due fili di rame coperti di gutta-perca che sono inseriti nella pelle del pesce in prossimità dei nervi dell'organo e passa pure un tubo di vetro aperto alle due estremità, nel quale si tiene sollevata una colonna del liquido del vaso come indice. Irritando la torpedine colle correnti di una macchina elettro-magnetica si è certi che la torpedine dà la scossa; di questo possiamo anche assicurarci mettendo nel vaso assieme colla torpedine delle rane preparate. Così ci siamo accertati che la scarica avviene senza che il volume del pesce soffra alcuna variazione sensibile. Poteva accadere che il volume dell'organo non cangiasse, come avviene dei muscoli nell'atto della contrazione, i quali però s'accorciano. Per vedere se lo stesso avviene nella torpedine si prende una leva di paglia o di vetro delicatissima e a bracci molto disuguali, e si fa in modo che l'estremità del braccio più corto posi sulla faccia dell'organo. Si vedrà allora che nell'atto della scarica l'estremità del braccio lungo rimane immobile.

Vediamo ora quale è la relazione che esiste fra la funzione elettrica della torpedine e l'azione nervosa. Bastano a provare questa relazione le esperienze che abbiamo fatto per stabilire che la cellula dell'organo elettrico costituisce l'elettro-motore elementare. Si sa pure che quando la torpedine o il ginnoto hanno dato un certo numero di scariche, bisogna lasciar passare un

certo tempo perchè l'organo ripigli la sua facoltà; l'organo e il suo sistema nervoso si stancano entrando in azione, come si stancano i nervi e i muscoli per la contrazione.

Merita a questo proposito di essere notata la funzione speciale che ha il quarto lobo del cervello sulla scarica dell'organo. Abbiamo già visto che irritando la torpedine in un punto qualunque del suo corpo, questo pesce reagisce poi per un' azione che giunge per mezzo dei nervi dei sensi dal punto irritato al cervello e dal cervello va all'organo elettrico per i grossi rami nervosi che vi si distribuiscono e che non hanno altra funzione che quella di determinare la scarica. Il quarto lobo è il centro in cui si raccoglie e da cui parte l'azione nervosa dell'organo. Eccovi una torpedine viva sulla quale scopro rapidamente il cervello. Cuopro il corpo della torpedine di rane preparate e poi via via irrito meccanicamente i vari lobi del cervello e la midolla allungata e spinale. M'accorgo facendo l'esperienza delicatamente che è l'irritazione del quarto lobo che determina specialmente la scarica, la quale ora è dell'organo destro, ora del sinistro, secondo che ora tocco la parte destra, ora la parte sinistra del quarto lobo. Tolgo anche affatto i tre primi lobi del cervello e taglio il midollo allungato immediatamente sotto il quarto lobo; allora il pesce non dà più la scarica nè volontariamente, nè irritato in un punto qualunque del suo corpo: non vi è più che l'irritazione del quarto lobo che dia luogo a scariche fortissime.

Ho voluto provare, irritando un filetto nervoso scoperto in mezzo all' organo, se la sua irritazione avesse mai eccitata la scarica nella parte dell'organo corrispon-

dente alla porzione centripeta di quel nervo: non ho mai in alcun caso ottenuto alcun segno di questa eccitazione retrocessiva del nervo dell'organo elettrico.

La stricnina e la morfina uccidono la torpedine svegliando delle forti contrazioni muscolari e nello stesso tempo obbligando l'animale a dare molte scariche. Colla stricnina si mette la torpedine nello stato di sopraeccitazione, per cui il più piccolo urto dato al piano su cui il pesce riposa, dà luogo alla scarica. L'azione del curaro sulla torpedine merita di essere notata. Una torpedine avvelenata col curaro e che non dà più contrazioni muscolari allorchè si irritano i suoi nervi, non cessa perciò di dare la scarica elettrica.

Conveniva anche studiare l'influenza della circolazione sanguigna e della respirazione sulla funzione elettrica della torpedine. Galvani fu uno dei primi a provare che la torpedine disanguata continuava a dare la scarica. Non è dunque la circolazione sanguigna immediatamente necessaria alla funzione dell'organo elettrico. La temperatura dell'acqua in cui la torpedine vive ha una grande influenza sopra quella funzione. Se la torpedine è messa nell'acqua a 3 o 4 gradi sopra zero o anche più fredda, cessa presto di respirare, di muoversi e di dar scariche. Non è morta per ciò ed anzi è tenendola nell'acqua fredda che si può conservare per più lungo tempo in una quantità limitata di acqua di mare, giacchè respirando meno, l'aria di quella quantità d'acqua dura per più lungo tempo a servire alla sua respirazione. Dopo pochi minuti d'immersione nell'acqua da + 15 a 20 gradi, la torpedine che fu nell'acqua fredda ripiglia la funzione elettrica. Non è così quando la torpedine è messa nell'acqua a + 30 o 40

gradi. Allora la torpedine dà un certo numero di scariche e presto muore. La circolazione e la respirazione attivate dalla maggior temperatura accrescono forse l'azione nervosa, ma poi la respirazione cessa perchè l'aria dell'acqua è troppo presto consumata. Ho ottenuta in alcune esperienze, misurando e analizzando l'aria disciolta nell'acqua in cui le torpedini vivono, la prova che la funzione elettrica ripetuta è accompagnata da una maggior attività della respirazione del pesce: perciò a condizioni eguali è assai minore la quantità d'ossigene dell'aria disciolta nell'acqua in cui è stata una torpedine che fu obbligata a dare molte scariche, di quella dell'acqua di una torpedine lasciata in riposo.

Aggiungerò finalmente che la coagulazione dell'albumina della sostanza dell' organo distrugge la funzione elettrica.

La conclusione ultima alla quale tutte le esperienze fatte sulla torpedine e sugli altri pesci elettrici ci hanno condotto è la seguente: *l'irritazione del nervo dell'organo elettrico trasmessa nel senso della sua ramificazione, giunta alle estremità ultime del nervo e per conseguenza nella cellula elementare dell'organo, polarizza elettricamente questa cellula e per un'azione analoga all'elettro-magnetismo sviluppa trasversalmente alla sua direzione e sulle due faccie di ogni diafragma stati elettrici opposti.*

Non vi è più difficoltà ad intendere colla scorta di questo principio le proprietà principali dell'organo elettrico. Ogni prisma dell'organo risultando da un gran numero di cellule sovrapposte, è chiaro che i poli dell'organo devono essere sempre alle estremità dei prismi e

che la tensione elettrica crescerà coll'altezza dei prismi e coll'energia dell'azione nervosa.

Non così facile ad intendersi è, almeno colla legge della pila voltaica, l'influenza del volume delle cellule e sopra tutto del numero dei prismi. Queste due condizioni dovrebbero far variare la resistenza interna delle pile e dei prismi e non la forza elettro-motrice e quindi non l'intensità della scarica, poichè questa si trasmette generalmente per corpi che hanno una resistenza molto più grande che l'organo della torpedine. Che la tensione dipenda dal numero delle cellule lo prova l'influenza dell'altezza dei prismi e lo prova pure la scarica della torpedine, che, a altezza eguale d'organo, è più forte di quella del ginnoto, perchè le cellule elementari nel primo pesce sono molto più sottili.

Se noi conoscessimo la natura intima dell'elemento elettro-motore dei pesci elettrici sapremmo molto probabilmente come agiscono nella scarica il numero dei prismi e la loro sezione. È un fatto che la scarica al galvanometro cresce coll'estensione degli elettrodi che toccano l'organo della torpedine. Poichè ognuno dei prismi si polarizza indipendentemente l'uno dall'altro sotto l'irritazione del proprio nervo, si può concepire che la scarica totale sia l'effetto della somma delle scariche simultanee, benchè indipendenti, dei diversi prismi.

Ci rimane dunque a sapere qual è la maniera intima di agire dell'elettro-motore elementare e quindi a scoprire la relazione fra la distribuzione dei nervi nell'organo, la sua struttura e la distribuzione degli stati elettrici nell'organo stesso.

Non è che in questi ultimi tempi che siamo giunti a gettare qualche luce sopra questi problemi, ed io ter-

minerò lo studio della funzione elettrica dei pesci esponendovi brevemente i risultati principali ottenuti sopra questo soggetto.

È provato oggi che l'organo della torpedine, e probabilmente anche quello degli altri pesci elettrici, non è già un elettro-motore che si formi istantaneamente, ma che invece è un elettro-motore costantemente attivo. Prendo perciò sopra una torpedine anche morta da molte ore un pezzo d'organo, che riduco di forma cubica e il più piccolo possibile senza dimenticare la posizione delle basi dei prismi relativamente alla schiena e al ventre del pesce. Questo pezzo posato sul sostegno di gutta-perca è portato in contatto dei cuscini del galvanometro più delicato. Se ottocco le basi corrispondenti al ventre e alla schiena, ottengo una deviazione che è di tutto il quadrante e che indica una corrente che è nel galvanometro diretta dalla schiena alla pancia come nella scarica del pesce. L'ago si fissa a 70 o 80 gradi, e la deviazione dura per molte e molte ore decrescendo lentissimamente. Toccando la parete longitudinale dei prismi e or l'una or l'altra delle basi, si ottiene pure una deviazione che è minore ma diretta nel senso della scarica. Non ho nessuna deviazione nel solo caso in cui tocco nel tempo stesso qualunque delle due faccie laterali.

Questo potere elettro-motore costante dell'organo della torpedine persiste molto tempo dopo che l'eccitabilità del nervo è completamente estinta. Ho lasciata una torpedine per 24 ore in una scatola di latta circondata da un miscuglio frigorifico e dopo questo tempo un pezzo del suo organo e un pezzo dell'organo di un'altra torpedine lasciata all'aria, non hanno presentata alcuna diffe-

renza. Sono riescito ad avere questo risultato anche sopra una torpedine che era stata per cinque giorni in mezzo al ghiaccio. Anche in una torpedine avvelenata col curaro il potere elettro-motore proprio dell' organo persiste come in una torpedine intatta.

Ho pure verificato, sempre ricorrendo al metodo così detto differenziale, che questo potere elettro-motore dell' organo era indipendente dalla grossezza del pezzo su cui si opera, cioè dal numero dei prismi di cui è composto e che invece è proporzionale alla lunghezza dei prismi.

Questo potere elettro-motore non varia per la natura del gas in cui il pezzo d'organo è tenuto. Questo risultato fu verificato tenendo il pezzo dell'organo nell'aria più o meno rarefatta, nell'ossigine, nell' acido carbonico, nell'idrogene. Al contrario, se l'organo è tenuto immerso in un liquido qualunque per 10 o 12 ore, e anche meno, il suo potere elettro-motore è molto indebolito. Le soluzioni saline agiscono debolmente, ma le soluzioni acide o alcaline anche moltissimo *diluite* e in cui l'organo sta immerso anche per poche ore, distruggono interamente il poter elettro-motore.

Paragonando un pezzo d'organo preso sopra una torpedine viva con un gastrocnemio di rana della stessa lunghezza, ho trovato che il potere elettro-motore dell'organo è prevalente sul muscolo; però due gastrocnemi riuniti superano l'organo.

Il risultato che considero il più interessante per la teoria della funzione elettrica dei pesci è quello dell'influenza che ha l'eccitazione del sistema nervoso dell'organo ad accrescere permanentemente il suo potere elettro-

motore. L'esperienza è netta e facile ad eseguirsi. Prendo sulla stessa torpedine due pezzi d'organo uguali procurando che ognuno di essi abbia unito un pezzo di tronco nervoso. Oppongo questi due pezzi l'uno all'altro toccando assieme o le due faccie della schiena o le due faccie della pancia e mi assicuro che non si ha corrente differenziale. Allora, scomposta la doppia pila, irrito o colla corrente elletrica o colle forbici il nervo di uno dei pezzi il quale dà allora diverse scariche successive che sono indicate dalla rana galvanoscopica. Ricompongo poscia la pila e trovo una forte corrente differenziale nel pezzo dell'organo che ha dato le scariche e che è stato in azione. La corrente differenziale và diminuendo fino ad essere nulla dopo un certo tempo. Allora si può riprodurre il fenomeno sullo stesso pezzo e questo varie volte di seguito, notando però sempre una diminuzione nella corrente differenziale, la quale è necessariamente dovuta al cessare dell'organo di dare le scariche.

La conclusione è che l'eccitazione del sistema nervoso accresce il potere elettro-motore dell'organo; nell'animale vivo lo esalta sino al punto da dare delle forti scariche: il potere elettro-motore però persiste anche quando i nervi dell'organo hanno perduto da molto tempo ogni traccia di eccitabilità.

Aggiungerò finalmente che la funzione dell'organo elettrico non è accompagnata da sviluppo di calore anche usando per scoprirlo gl'istrumenti i più delicati, e che un pezzo d'organo rinchiuso in uno spazio limitato d' aria può dare molte scariche di seguito senza che sia modificata sensibilmente la composizione dell'aria.

Queste conclusioni dedotte da esperienze rigorose mo-

strano le differenze che passano fra la funzione dell'organo elettrico e quella della contrazione muscolare. Senza pretendere di darvi la teoria del modo d'agire dell' organo elettrico non voglio tacervi anche per rendere più chiari i risultati ottenuti, che questi risultati si spiegherebbero facilmente colla ipotesi che in ogni cellula vi sieno sostanze di natura diversa che reagiscono chimicamente generando correnti elettriche e che queste materie sieno separate in maggior quantità per l'eccitazione del sistema nervoso. Avvertirò che queste sostanze potrebbero essere un acido e una base e noterò che se si lascia a sè in un imbuto un pezzo d' organo tagliuzzato, scola un liquido che dopo qualche ora ha una reazione alcalina: l'infusione acquosa dello stesso organo tagliuzzato evaporata lentamente lascia un residuo che ha una reazione acida molto distinta. Ripeto, non ho inteso con ciò dirvi in che consiste l' organo elettromotore della torpedine: certo è però che i risultati che vi ho riferito in ultimo luogo aprono una via nuova nello studio di questa sorgente di elettricità animale.

DEI FENOMENI ELETTRICI
DELLA
CONTRAZIONE MUSCOLARE.

Sul principio del 1842 io comunicava all'Accademia Reale delle Scienze di Parigi un'esperienza che ha dato origine ad una parte importante dell'elettro-fisiologia.

Eccovi quest'esperienza. Preparo una o più rane galvanoscopiche, che poso al solito sul sostegno di guttaperca, e distendo i nervi di queste rane sopra la superficie dei muscoli messi allo scoperto in un animale qualunque vivo o recentemente ucciso. Per rendere l'esperienza più facile prendo una rana preparata alla Galvani e sopra i muscoli delle coscie stendo i nervi delle rane galvanoscopiche. Qualunque sia il modo con cui fo contrarre i muscoli, nello stesso istante entra in contrazione la rana galvanoscopica. Anche posando il nervo delle rane galvanoscopiche sopra il cuore di una rana o d'un altro animale vivo, ad ogni contrazione di quel muscolo entra in contrazione la rana galvanoscopica. Questo fenomeno, che chiameremo per brevità *contrazione indotta*, si verifica qualunque sia il modo con cui il nervo della rana galvanoscopica è distribuito sul muscolo, e se la rana, che chiamerò inducente, è molto vivace, si ottiene la contrazione indotta anche posando il nervo sulle estremità della zampa, oppure distaccando prontamente un pezzo di muscolo e obbligandolo a contrarsi col tagliuzzarlo in diversi sensi. È così che l'esperienza della contrazione indotta apparisce analoga alla scarica dell'organo della torpedine.

Non esiste alcun altro tessuto organico che irritato in un modo qualunque svegli la contrazione indotta: il muscolo stesso, se preso sopra rane uccise col curaro o coi tendini tagliati in modo che irritando il nervo non insorga la contrazione, non dà luogo alla *contrazione indotta*. Invece avendo diverse rane galvanoscopiche molto vivaci e di fresco preparate e disponendole in serie, cioè posando il nervo dell'una sul gastrocnemio dell'altra, si

vedranno entrar tutte in contrazione, allorchè si fa contrarre una delle estreme. È questo che si può chiamare aver la *contrazione indotta di secondo, di terzo ordine.* Fu studiata l'influenza dei corpi interposti fra il nervo della rana galvanoscopica e il muscolo in contrazione e si trovò che tanto uno strato molto buon conduttore, come una foglia d'oro, quanto uno strato isolante solido, benchè estremamente sottile, impedivano la contrazione indotta. Nella supposizione che il fenomeno fosse analogo alla scarica della torpedine, si può intendere come lo strato metallico buon conduttore, lasciando passare interamente dentro di sè la scarica, ne impediva l'effetto sul nervo. Fu interposto uno strato d'olio o di trementina e la contrazione indotta si produsse ugualmente: non ne veniva però esclusa l'idea della scarica elettrica, imperocchè mettendosi in condizioni simili era provato coll'esperienza che una piccola scarica della bottiglia si faceva sentire sul nervo della rana galvanoscopica.

Voglio mostrarvi ancora un'altra esperienza tentata pure colla rana galvanoscopica e che rischiara meglio la natura della contrazione indotta.

Preparata la rana inducente e posata sopra un piano ben isolante, metto due stoppini di cotone o due striscie di carta imbevute d'acqua in contatto delle estremità della rana, cioè uno dei stoppini in contatto dell'alto della coscia e l'altro colla gamba, e ripiego i due cuscini in modo da lasciare un intervallo di alcuni millimetri fra le loro estremità libere. Avendo allora varie rane galvanoscopiche fresche e vivaci si chiude il circuito, posando i loro nervi fra i due stoppini. Vedrete allora contrarsi le rane galvanoscopiche, tutte le volte che la rana intera entra in

contrazioni. Se uno dei stoppini si distacca, se in un punto qualunque si apre questo circuito, non si hanno più le contrazioni della rana galvanoscopica. Questo risultato conduce necessariamente ad ammettere che nell'atto della contrazione un arco omogeneo conduttore applicato sull'estremità del muscolo è percorso da una corrente elettrica o piuttosto da una scarica, se si giudica dalla sua breve durata.

Variando queste esperienze colla rana galvanoscopica, mettendone alcune coi nervi in una certa direzione ed altri coi nervi in una direzione opposta, si riscontra generalmente che la contrazione non ha luogo che per le rane galvanoscopiche di cui il nervo è disteso dalla estremità inferiore alla superiore del muscolo inducente. In somma, avendo due rane galvanoscopiche, di cui i due nervi chiudono il circuito, e disposte l'una contro l'altra, la contrazione indotta più costante si ha in quella che ha la gamba rivolta verso l'estremità superiore del muscolo inducente.

Esperienze simili furono tentate sopra animali a sangue caldo e con risultati analoghi, benchè esse siano assai difficili per la breve durata in questi animali dell'irritabilità muscolare.

Immaginando sempre più piccoli i stoppini umidi messi in contatto della coscia inducente si giunge così a passare da questo caso a quello della contrazione indotta, ed a concludere che il fenomeno è della stessa natura, tanto posando il nervo sul muscolo direttamente, quanto facendo arco nel modo che vi ho mostrato.

Si giungeva così alla conclusione, che la contrazione indotta era realmente l'effetto di una scarica elettrica

che accadeva nell'atto della contrazione e di cui la direzione era nell'arco esterno contraria alla corrente del muscolo stesso allo stato di riposo.

Per quanto la rana galvanoscopica fosse l'istrumento il più conveniente per lo studio di correnti elettriche di una breve durata, conveniva ricorrere al galvanometro e completare lo studio di questi effetti elettrici della contrazione colle indicazioni precise di quell'istrumento. Ciò fece Du-Bois Reymond usando un galvanometro delicatissimo e facendo contrarre più volte di seguito il muscolo inducente perchè l'azione si prolungasse. Ecco in qual modo Du-Bois Reymond fa l'esperienza. Presa una rana galvanoscopica e posta sui cuscini del galvanometro, si tiene il nervo isolato per poi farvi passare una serie di correnti elettriche che devono quasi tetanizzare il muscolo, senza che vi sia dubbio che questa corrente passi nel galvanometro. Da principio, come è naturale, l'ago devia per la corrente muscolare. Allorchè l'ago è discretamente fisso si fa contrarre il muscolo, e allora, se le contrazioni sono forti e sostenute, si vedrà l'ago discendere allo zero, passare al di là, e fissarsi nel quadrante opposto con una certa deviazione, la quale dura finchè le contrazioni sono forti.

Per togliere ogni dubbio sull'esattezza dell'esperienza, Du-Bois Reymond si è assicurato che accadeva lo stesso irritando il nervo col calore o con mezzi meccanici o prendendo una rana avvelenata colla noce vomica.

Da tutto ciò Du-Bois Reymond concludeva che, *nell'atto della contrazione il potere elettro-motore di un muscolo diminuiva, per cui venendo a prevalere sulla corrente muscolare la corrente opposta dovuta alla polarità se-*

condaria delle lastre, non solo l'ago discende allo zero, ma è costretto a deviare in senso opposto.

Allorchè si fa l'esperienza usando due gastrocnemi opposti, di cui uno solo si fa contrarre, la spiegazione dell'esperienza è anche più facile per Du-Bois Reymond, perchè allora è la corrente del muscolo rimasto in riposo che è prevalente e costringe l'ago a deviare in senso contrario.

Quanto poi al fenomeno della contrazione indotta propriamente detto, Du-Bois Reymond ammette, che allorchè il nervo della rana galvanoscopica è posto in contatto del muscolo, la corrente muscolare circola in esso e che la diminuzione rapida o la variazione negativa, come egli dice, della corrente stessa è la causa della contrazione della rana galvanoscopica. Ciò suppone che nel nervo di questa rana si stabilisca costantemente il circuito della corrente muscolare: noi abbiamo invece visto che la contrazione indotta si ottiene qualunque sia il modo con cui quel nervo è distribuito, che si ha toccando col nervo solamente le estremità della gamba della rana e che tenendo dietro al momento della contrazione ne risulta che il nervo è percorso da una scarica che è in direzione opposta alla corrente muscolare.

Ho creduto che a togliere ogni dubbio sull'interpretazione del fenomeno elettrico che accompagna la contrazione bastasse ripetere le esperienze col galvanometro col metodo che esclude le polarità secondarie. Questo ho fatto dopo essermi assicurato che non vi era infatti traccia sensibile di polarità secondaria, anche dopo aver fatto passare nelle lastre delle correnti molto più intense della corrente muscolare. Or bene, anche in questo modo

quando si svegliano delle forti contrazioni nel muscolo posto nel circuito del galvanometro, l'ago discende immediatamente e va per qualche istante ad oscillare nel quadrante opposto. In una parola, il risultato non è diverso, sia quando nell'esperienza entrano le polarità secondarie delle lastre, sia quando queste polarità sono interamente escluse.

Per riescire meglio nell'esperienza, invece del gastrocnemio si usa la coscia della rana dalla quale si ha da principio una corrente muscolare, che è piccola e spesso anche nulla. Allora sotto le contrazioni, la deviazione dell'ago è immediatamente nel senso stesso in cui questa deviazione avviene, quando da principio circolava nel galvanometro e in senso contrario la corrente muscolare.

Voglio anche mostrarvi una disposizione molto semplice e colla quale l'esperienza riesce più facile e più sicura. Pratico in un pezzo di legno verniciato due piccole cavità, che hanno la forma di due coscie riunite di una rana. Nello stesso legno è praticata pure un'altra cavità divisa in due compartimenti, ben isolati fra loro, pieni di solfato di zinco e in cui pescano le lastre amalgamate del galvanometro. Prendo una rana ben vivace e la riduco alle due coscie sole e lascio il nervo lombare ad una sola coscia. Ho lasciata l'altra coscia benchè non si debba contrarre, solo per non creare nella coscia inducente un taglio trasversale che introdurrebbe una nuova cagione di corrente muscolare. Per stabilire il circuito adopero due pezzi di cordone di canapa fissati colla cera lacca sopra una lastra di vetro, la quale è posta in modo che da una parte i due cordoni toccano le estremità del galvanometro e dall'altra due punti della coscia

alla distanza di 10 millimetri circa fra loro. Si preme colla lastra la coscia per essere certi che anche durante la contrazione i contatti restano inalterati. Generalmente quando il circuito si chiude si ha una piccola deviazione ora in un senso, ora nell'altro indifferentemente, come si sà accadere toccando in vari punti i muscoli della coscia. Si irrita allora con una corrente più volte ripetuta di seguito il nervo lombare il quale è tenuto sollevato ed isolato con un filo di seta. La deviazione che insorge e che dura per tutto il tempo che durano le contrazioni forti della coscia indica sempre una corrente che è diretta nel galvanometro dall'estremità inferiore alla superiore della coscia, cioè in direzione contraria a quella che si ha dal gastrocnemio o dalla rana intera in riposo.

Ho anche modificata questa esperienza creando con un piccolo taglio una sezione trasversale nella parte superiore della coscia.

In questo modo circola da principio nel galvanometro una corrente muscolare diretta in senso contrario alla corrente del gastrocnemio. Si ripete l'esperienza sulla coscia, cioè si fa contrarre e tutte le volte che si hanno varie contrazioni violenti, si vede pure crescere la deviazione al galvanometro. In questo caso la scarica che accompagna la contrazione è nel senso stesso della corrente che circolava prima nel galvanometro.

Fu opposto in Germania a queste esperienze e conclusioni un modo di far l'esperienza della contrazione indotta al galvanometro, che doveva condurre ad una conseguenza opposta alla nostra e col quale si è creduto poter evitare le polarità secondarie. Questo modo consiste nel far contrarre più volte il muscolo e indi nel chiu-

dere il circuito del galvanometro. Questa esperienza, che ho ripetuta e variata molte volte, conduce ad un risultato che era da prevedersi dopo l'osservazione costante e sulla quale ho più volte insistito, che cioè il fenomeno elettrico della contrazione decresce rapidissimamente coll'indebolirsi della contrazione e in generale non si produce che sotto le contrazioni le più forti che sono le prime e che presto cessano specialmente usando una forte corrente indotta per eccitare il nervo. Il risultato è, che in qualche caso appena si chiude il circuito dopo accadute le prime contrazioni, l'ago fa una piccola deviazione in senso opposto alla corrente muscolare, qualche volta si vede fermo e incerto nei movimenti, e se si chiude il circuito dopo molte contrazioni devia nel senso della corrente muscolare, ma più debolmente assai che col muscolo in riposo.

Da tutti i risultati che vi ho riferito, tanto operando col galvanometro che colla rana galvanoscopica, mi sento sempre più indotto alla conclusione, alla quale è pur giunto il Cima ripetendo queste esperienze sopra animali superiori, che cioè nell'atto della contrazione di certi muscoli vi è una corrente istantanea o piuttosto una scarica, la quale è diretta nel galvanometro in senso contrario alla corrente che vi circola allorchè i muscoli toccati colle estremità del galvanometro sono in riposo.

Confessiamo però che per generalizzare convenientemente questo risultato sarebbe necessario di poter operare sopra muscoli di animali superiori nei quali pur troppo l'irritabilità muscolare cessa rapidissimamente.

Questa conclusione non ci conduce già ad immaginare che i fenomeni elettrici del muscolo in riposo e quelli del muscolo in contrazione hanno un'origine diversa.

Malgrado l'apparenza, noi abbiamo anzi la convinzione opposta, e se vi potesse essere un qualche vantaggio nelle scienze sperimentali ad immaginare delle ipotesi, noi potremmo, fondandoci anche sopra analogie, con apparati elettrici ben noti, concepire come dallo stesso elettro-motore si possa con un cambiamento di forma nelle varie parti del circuito ottenere nel galvanometro correnti in direzioni opposte. Ma questo procedimento non è quello che vogliamo seguire e preferiamo piuttosto di dirvi che dobbiamo aspettare di giungere alla cognizione vera della forma dell'elettro-motore muscolare, per vedere scomparire questa specie di anomalia.

Terminerò questa lezione mostrandovi un nuovo fatto di elettricità muscolare il quale viene luminosamente in appoggio della teoria che ci siamo formati sulla produzione di questa elettricità.

Preparo sopra la stessa rana due mezze coscie, le oppongo l'una all'altra e trovo al galvanometro che sono eguali. Allora fo contrarre più volte una di queste mezze coscie, irritando in un modo qualunque il nervo che è unito. Ricompongo subito dopo la doppia pila e trovo allora una forte corrente differenziale nel senso del muscolo lasciato in riposo. La corrente differenziale dura un certo tempo, va sempre diminuendo e finalmente l'ago torna a zero. Con nuove contrazioni si produce il fenomeno, il quale è naturalmente sempre meno intenso, perchè le contrazioni si fanno sempre più deboli.

La conseguenza di questo fatto, secondo tutte le analogie, è che le azioni chimiche da cui dipende l'elettricità muscolare si consumano colla contrazione e ripigliano adagio adagio col riposo.

Questo fatto non va confuso col fenomeno elettrico istantaneo della contrazione indotta che si produce nell'atto stesso della contrazione.

Merita di essere notata la differenza che passa fra l'organo elettrico della torpedine e l'elettro-motore muscolare. La funzione del primo non sviluppa calore, non produce movimento, non è accompagnata da azioni chimiche di combustione fra l'ossigine e la sostanza dell'organo: l'irritazione nervosa dell'organo della torpedine ne accresce permanentemente il potere elettro-motore, come se quella irritazione agisse sopra un apparecchio di secrezione e se dal prodotto di questa secrezione avesse origine l'elemento elettro-motore dell'organo. Nel muscolo invece tutto procede dagli atti chimici che avvengono fra l'ossigene e la sostanza del muscolo; quindi calore, movimento, elettricità che accompagnano quelli atti chimici. Quando un eccesso di contrazione avviene si fa un eccesso di consumo di quelli atti chimici, a cui deve tener dietro la diminuzione del potere elettro-motore del muscolo.

Giunto così al termine di questo Corso, sento il dovere di ringraziarvi dell'accoglienza benevola con cui lo avete seguito e mi auguro un'altra non lontana occasione che mi permetta di trattare dinanzi a voi qualche altro di quei rami della Fisica di cui più particolarmente mi sono occupato e mi occupo.

Torino, 5 maggio 1861.

Invece dell'elettrodo impolarizzab. di Ostwald si adopera analogo elettrodo a pennello inzuppato di sol. fisiologica
(modello Dem – Ampère: